

UNIVERSIDAD DE GRANADA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y
PROYECTOS DE INGENIERÍA



ESTUDIO DEL PROCEDIMIENTO DE COMPACTACIÓN EN LABORATORIO
PARA MEZCLAS RECICLADAS EN FRÍO CON EMULSIÓN BITUMINOSA

A LABORATORY COMPACTION PROCEDURE FOR COLD RECYCLED
MIXES WITH BITUMEN EMULSION

TESIS DOCTORAL - 2012

M^a JOSÉ MARTÍNEZ-ECHEVARRÍA ROMERO

Para la obtención del

GRADO DE DOCTOR INTERNACIONAL POR LA UNIVERSIDAD DE GRANADA

DIRECTORES:

M^a CARMEN RUBIO GÁMEZ, Universidad de Granada

ANTONIO MENÉNDEZ ONDINA, Universidad de Granada

RODRIGO MIRÓ RECASENS, Universidad Politécnica de Cataluña

Editor: Editorial de la Universidad de Granada
Autor: M^a José Martínez Echevarría Romero
D.L.: GR 3129-2012
ISBN: 978-84-9028-253-3

UNIVERSIDAD DE GRANADA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS
DE INGENIERÍA



ESTUDIO DEL PROCEDIMIENTO DE COMPACTACIÓN EN LABORATORIO PARA
MEZCLAS RECICLADAS EN FRÍO CON EMULSIÓN BITUMINOSA

A LABORATORY COMPACTION PROCEDURE FOR COLD RECYCLED MIXES WITH
BITUMEN EMULSION

TESIS DOCTORAL - 2012

M^a JOSÉ MARTÍNEZ-ECHEVARRÍA ROMERO

DIRECTORES:

M^a CARMEN RUBIO GÁMEZ,

Doctora Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos

Universidad de Granada

ANTONIO MENÉNDEZ ONDINA, Universidad de Granada

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Universidad de Granada

RODRIGO MIRÓ RECASENS, Universidad Politécnica de Cataluña

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Universidad Politécnica de Cataluña

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo no podría haberse llevado a cabo sin el apoyo y la colaboración de numerosas personas que me han rodeado durante estos últimos años. Son muchos los que me han ayudado en este período, pero es difícil citarlos a todos, por lo que ruego me perdonen por no nombrarlos personalmente. A todos ellos muchas gracias.

Quiero agradecer a mis directores de Tesis, D^a. M^a Carmen Rubio Gámez, D. Rodrigo Miró Recasens y D. Antonio Menéndez Ondina, el tiempo invertido y el interés constante en el avance de esta investigación. Muchas gracias por darme la oportunidad de trabajar con vosotros y por guiarme y asesorarme en todas las etapas de este estudio.

A mis compañeros del Laboratorio de Ingeniería de la Construcción, LABIC, sin los cuales este trabajo no podría haber llegado a buen término. Gracias por vuestra desinteresada ayuda en la ejecución y gestión de los numerosos ensayos realizados en el laboratorio, y gracias por vuestras prontas respuestas e informaciones siempre que han sido requeridas.

A todos mis compañeros del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería y a los del Departamento de Ingeniería Civil: a los ya doctores, por aconsejarme y transmitirme sus ánimos ante una situación ya vivida y a los no doctores, por compartir inquietudes y preocupaciones ante una situación incierta y desconocida.

Gracias a mis padres, a mis hermanos y demás familiares y amigos que me han ayudado y apoyado en los momentos difíciles por los que se pasa durante la elaboración de una Tesis.

El tiempo que me ha absorbido y robado la elaboración de esta Tesis Doctoral está compensado por el orgullo del trabajo final obtenido. Por otro lado, el tiempo restado a la dedicación a mi familia, quedará siempre en el debe, no podré nunca compensar la balanza, por lo que les dedico todo este esfuerzo y mi trabajo a ellos: Jose, Paula, Elvira y Blanca.

Quiero, por último, expresar mi agradecimiento a la Consejería de Obras Públicas y Vivienda de la Junta de Andalucía, que con la firma del convenio denominado “Análisis del Comportamiento de Firms Reciclados” con la Universidad de Granada, dio lugar al planteamiento de esta investigación y facilitó el acceso a la documentación y a las actuaciones que de esta técnica se estaban llevando a cabo en la comunidad autónoma andaluza para la recopilación del material a ensayar.

RESUMEN

Las propiedades de las mezclas asfálticas que constituyen las capas superiores de los firmes flexibles y semiflexibles se van deteriorando con el paso del tiempo por acción del tráfico y del clima. La conservación de firmes es una actuación necesaria para garantizar las características iniciales que debe presentar una carretera y asegurar una conducción cómoda y segura para el usuario. El fresado y reposición de mezclas bituminosas como actuación de rehabilitación, genera un volumen de residuos inertes que en muchos países, debido a las restricciones de tipo medioambiental y a la falta de espacio, suponen un problema. Las técnicas de reciclado de firmes constituyen una alternativa que permiten la reutilización del material fresado en la fabricación de nuevas mezclas asfálticas.

El reciclado in situ en frío de pavimentos asfálticos es una de técnica de rehabilitación que permite reutilizar el 100% del material procedente del fresado (RAP) de la carretera deteriorada, a temperatura ambiente; es decir sin calentar ninguno de los componentes de la mezcla, lo que supone una reducción en las emisiones de gases a la atmósfera. No es necesario con esta técnica el transporte del material fresado a la central de fabricación de mezclas asfálticas ni el transporte de la mezcla nueva resultante hasta la obra en la que tiene lugar el extendido y compactación, lo que supone otra ventaja añadida de carácter ambiental y operativa.

En España, el diseño de la fórmula de trabajo para definir el contenido óptimo de ligante se realiza mediante el ensayo de Inmersión-Compresión recogido en la norma NLT-162/00. Con este método se fabrican unas probetas en laboratorio mediante compactación estática que alcanzan unas densidades superiores a las que realmente se obtienen en obra. Esta es una de las limitaciones de la técnica y que se ha propuesto analizar en este trabajo de investigación.

Por esto, el objetivo principal planteado ha sido reproducir un material reciclado en laboratorio de las mismas características que el ejecutado en obra. El punto de partida para esta investigación era la densidad alcanzada en obra. Se estudió un procedimiento para medir la densidad in situ de mezclas bituminosas fabricadas con emulsión sin necesidad de recurrir a extracción de testigos mediante la utilización del equipo no nuclear denominado PQI (Pavement Quality Indicator).

Se seleccionaron tres actuaciones de reciclado en ejecución en el sur de España durante el período en el que se desarrolló esta investigación y de ellas se obtuvo el material fresado y la emulsión a utilizar en los trabajos de laboratorio. Con el compactador de segmentos de rodillo y partiendo de un procedimiento de compactación utilizado para mezclas bituminosas en caliente se estudiaron diversos programas de compactación variando las cargas aplicadas. Se fabricaron una serie de probetas con cada uno de los procedimientos a

estudiar y tras someterlas a un proceso de maduración forzoso en estufa se les determinaba la densidad. Se eligió como procedimiento definitivo para materiales reciclados en frío aquel con el que se alcanzaron las densidades más similares a las de obra.

De las probetas paralelepípedas fabricadas en este compactador mediante el programa definido se extrajeron testigos sobre los que se realizaron una serie de ensayos para determinar módulos dinámicos y resistencias a tracción indirecta. Los resultados obtenidos fueron comparados con los resultados obtenidos en testigos extraídos de las obras de las que procedía el material fresado a los que se les realizaron los mismos ensayos. Se comprobó que las respuestas fueron similares en ambos grupos de testigos, de laboratorio y de obra, hecho que corroboraba que el procedimiento definido era adecuado para este tipo de material. A continuación, con testigos de laboratorio se definió una ley de fatiga del material reciclado y como aplicación práctica se analizó la vida útil del firme regenerado.

Los resultados de esta investigación proporcionan un procedimiento de compactación en laboratorio con el compactador de segmentos de rodillo para materiales reciclados en frío con emulsión que permite reproducir de una manera fiable el material extendido en obra. Este material podrá ser sometido a ensayos de caracterización y su respuesta será semejante al comportamiento que presente el reciclado cuando entre en servicio. Esta reproducción del material reciclado en laboratorio permitirá impulsar el desarrollo e implementación de nuevos diseños y estudios de firmes con capas recicladas en frío.

Palabras clave: reciclado “in-situ” en frío, emulsión, procedimiento de compactación, densidad, compactador de segmentos de rodillo

ABSTRACT

The properties of asphalt mixes that make up the upper layers of flexible and semi-flexible pavements gradually deteriorate over time because of vehicle traffic loads and climate conditions. Pavement conservation and rehabilitation is necessary in order to guarantee the optimal properties of the road surface course and assure comfortable and safe driving conditions for users. The milling and re-application of bituminous mixes for pavement rehabilitation generates a large quantity of inert waste. In many countries this is a problem because of strict environmental regulations as well as lack of space at landfills. Pavement recycling techniques are an alternative that allow the reuse of this waste in asphalt mixes.

The cold in-place recycling of asphalt pavement is a rehabilitation technique that permits the reuse of 100% of the milled material of a deteriorated road at ambient temperature. In other words, none of the mix components needs to be heated, which means a significant reduction in gas emissions. This technique also signifies that milled material no longer has to be moved to an asphalt mix plant. Nor is it necessary to transport the newly elaborated mix to the worksite for spreading and compaction. These are added advantages both from an environmental as well as an operational perspective.

In Spain, the design of the job mix formula to define the optimal binder content is based on the results of the Immersion-Compression test as specified in the NLT-162/00 Standard. This method uses static compaction to manufacture laboratory test specimens. However, the specimens thus produced attain densities greater than those at the worksite. This is one of the disadvantages of this method, and for this reason, the focus of this research was to find a better and more accurate way of manufacturing test specimens in the laboratory.

Accordingly, our main objective was to reproduce recycled material in the laboratory with the same characteristics as the material at the work site. The starting point for this research was the calculation of the density actually reached in real work conditions. Consequently, one of the focuses of our research was the possible use of a non-nuclear PQI (Pavement Quality Indicator), a device for the on-site measurement of the density of bituminous mixes manufactured with emulsion without the need to extract pavement cores.

Three pavement recycling initiatives in southern Spain were selected, which were being implemented at the same time as this research study. These road construction projects were the source of the milled material and the emulsion used for the laboratory work. Based on a compaction procedure for hot bituminous mixes, a roller sector compactor was used to study different compaction programs in which different loads were applied. A set of test specimens were manufactured for each program, and after subjecting them to an oven-curing process, their density was calculated. The procedure finally selected for the cold

recycled material was the procedure in which the density of the specimens was similar to the density of the material at the work site.

Core samples were extracted from the parallelepiped specimens manufactured in this compactor, and a series of tests were performed on them in order to determine their dynamic modulus and indirect tensile strength. The results obtained were compared with the results obtained for pavement cores extracted at the road project sites which had initially provided the milled material. It was found that when the same tests were performed on both sets of samples, the results were similar. This showed that the procedure defined in our study is valid for this type of material. The laboratory samples were then used to define a fatigue law for the recycled material, and as a practical application, the useful life of the rehabilitated pavement was analyzed.

The results of this research study define a laboratory compaction procedure with a roller sector compactor for cold recycled material with emulsion that reliably reproduces the material at road construction sites. When this material was tested, its response was found to be similar to the performance of the on-site recycled material. This laboratory reproduction of recycled material facilitates the development and implementation of new designs and studies for road surface courses with cold recycled pavement layers.

Keywords: cold-in place recycling; emulsion; compaction procedure; density; roller sector compactor

INDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	3
1.1.	ANTECEDENTES	3
1.2.	OBJETIVOS	7
1.2.1.	OBJETIVO PRINCIPAL	7
1.2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
1.3.	ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL.....	7
2	ESTADO DEL ARTE	11
2.1	INTRODUCCIÓN.....	11
2.2	TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN Y REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	12
2.3	RESIDUOS DERIVADOS DE LAS ACTIVIDADES DE CONSERVACIÓN Y REHABILITACIÓN DE FIRMES DE CARRETERAS	14
2.4	RECICLADO DE FIRMES	17
2.4.1.	Reciclado en planta en caliente.....	19
2.4.2.	Reciclado “in situ” en caliente.....	24
2.4.3.	Reciclado en planta en frío.....	24
2.4.4.	Reciclado “in situ” en frío	25
2.4.4.1.	Reciclado in situ en frío con cemento	25
2.4.4.2.	Reciclado “in situ” con emulsión	26
2.5	RECICLADO IN SITU EN FRÍO CON EMULSIÓN BITUMINOSA	27
2.5.1.	INTRODUCCIÓN	27
2.5.2.	VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA TÉCNICA	27
2.5.3.	NORMATIVA TÉCNICA DE APLICACIÓN.....	30
2.5.4.	MATERIALES	32
2.5.4.1.	MATERIAL FRESADO	32
2.5.4.2.	EMULSIÓN BITUMINOSA	33
2.5.4.3.	ARIDOS DE APORTACION.....	35
2.5.4.4.	ADITIVOS.....	35
2.5.5.	DIMENSIONAMIENTO	36
2.5.6.	PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN	37
2.6.	EXPERIENCIAS EN RECICLADO IN SITU EN FRÍO CON EMULSIÓN BITUMINOSA.....	50
2.6.1.	ESTUDIOS DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN EN EUROPA	50
2.6.2.	OTRAS EXPERIENCIAS	57
2.7.	CONSIDERACIONES FINALES	61
3	METODOLOGÍA	65

3.1. INTRODUCCIÓN	65
3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	67
3.2.1. DETERMINACIÓN DEL CASO CONCRETO DE ESTUDIO	67
3.2.2. DENSIDAD DE REFERENCIA. NUEVO PROCEDIMIENTO MEDIDA EN OBRA	75
3.2.3. PROCEDIMIENTO DE COMPACTACIÓN EN LABORATORIO	76
3.2.4. ELABORACIÓN DE PROBETAS EN EL LABORATORIO	82
3.2.5. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN EN LABORATORIO	83
4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	95
4.1. DETERMINACIÓN DEL CASO CONCRETO DE ESTUDIO	95
4.2. DENSIDAD DE OBRA DE REFERENCIA. NUEVO MÉTODO EN OBRA	96
4.2.1. Relación entre los valores de densidad obtenidos con PQI y las variables humedad y temperatura proporcionadas por el equipo.	98
4.2.2. Variación de la densidad obtenida en laboratorio provocada por la variación del contenido de humedad de la mezcla	102
4.2.3. Comparación entre las densidades in situ obtenidas con el quipo nuclear, PQI y medida de densidades de testigos en laboratorio	104
4.2.4. Consideraciones finales	106
4.3. PROCEDIMIENTO DE COMPACTACIÓN EN LABORATORIO	106
4.4. ELABORACIÓN DE PROBETAS EN LABORATORIO.....	118
4.5. ENSAYOS MECÁNICOS	119
5 CONCLUSIONES	149
5 CONCLUSIONS	155
6 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	163
7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	167

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos de reciclado de firmes. Fuente: Asphalt in Figures, EAPA 2011	18
Tabla 2. Husos Granulométricos. Cernido Acumulado (% en masa).....	33
Tabla 3. Resistencias mínimas exigidas en el ensayo de Inmersión-Compresión. Artículo 20 PG-4	44
Tabla 4. Categorías de tráfico pesado. Norma 6.1 I-C “Secciones de Firme”	44
Tabla 5. Contenidos ligante material fresado	96
Tabla 6. Medidas realizadas con PQI.....	98
Tabla 7. Resultados SPSS relación densidad/humedad	100
Tabla 8. Resultados SPSS relación densidad/temperatura	101
Tabla 9. Número de medidas de densidad por los tres procedimientos.....	104
Tabla 10. Procedimiento de compactación REF-1	108
Tabla 11. Resultados procedimiento REF-1	110
Tabla 12. Procedimiento de compactación REF-2	111
Tabla 13. Resultados procedimiento REF-2	112
Tabla 14. Procedimiento REF-3	113
Tabla 15. Resultados procedimiento REF-3	114
Tabla 16. Procedimiento de compactación REF-4	115
Tabla 17. Resultados procedimiento REF-4	116
Tabla 18. Procedimientos de compactación	116
Tabla 19. Probetas realizadas para determinación del procedimiento de compactación	117
Tabla 20. Densidades de las probetas fabricadas con el procedimiento definitivo	118
Tabla 21. Testigos extraídos de probetas de laboratorio (b).....	122
Tabla 22. Valores Resistencias TI con y sin determinación de módulos.....	125
Tabla 23. Testigos de obra A-351 Écija-Osuna.....	126
Tabla 24. Testigos de obra A-472 Huelva.....	126
Tabla 25. Número total de Testigos	127
Tabla 26. Número de Módulos Dinámicos determinados	127
Tabla 27. Módulos testigos de laboratorio	128
Tabla 28. Módulos de testigos de obra y testigos de laboratorio	132
Tabla 29. Número de Tracciones Indirectas determinadas	134
Tabla 30. Categorías de tráfico pesado.....	145

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso ejecución reciclado in situ con emulsión.....	6
Figura 2. Proceso de deterioro y conservación de un firme	13
Figura 3. Central discontinua sin calentamiento RAP	21
Figura 4. Central discontinua con calentamiento simultáneo de RAP.....	22
Figura 5. Central discontinua con tambor paralelo	23
Figura 6. Central continua con tambor secador-mezclador	23
Figura 7. Planta de reciclado en frío.....	25
Figura 8. Emisiones de CO2 (Tn) en función del tratamiento. Fuente: Alkins et al., 2008	28
Figura 9. Evolución del módulo con el tiempo (horas).	58
Figura 10. Esquema de los trabajos de la investigación.....	66
Figura 11. Ubicación de las distintas actuaciones de reciclado	68
Figura 12. Equipo de reciclado	70
Figura 13. Detalle del estado del firme antes de la actuación.....	71
Figura 14. Tren de reciclado	72
Figura 15. Compactación de la mezcla reciclada	72
Figura 16. Recicladora antes de comenzar los trabajos de rehabilitación en la A-472	73
Figura 17. Extendido de la mezcla reciclada	74
Figura 18. Compactación de la mezcla reciclada	74
Figura 19. Compactador de impactos. Fuente: Norma UNE-EN 12697-30.....	76
Figura 20. Variación resistencia a compresión frente a carga de compactación Fuente: Miró et al. 2000.....	77
Figura 22. Diagrama del movimiento de la probeta	78
Figura 21. Conjunto para compactación vibratoria Fuente: Norma UNE-EN 12697-32.....	78
Figura 23. Compactador Segmentos de Rodillo	80
Figura 24. Plano esquemático de una placa de mezcla bituminosa.	81
Figura 25. Disposición de los testigos en la probeta.....	83
Figura 26. Forma del impulso de carga. Fuente: Norma UNE-EN 12697:26.....	86
Figura 27. Dispositivo para ensayo Tracción Indirecta	88
Figura 28. Distribución de tensiones teóricas sobre los planos diametrales horizontal	89
Figura 29. Probetas paralelepípedas defectuosas	91
Figura 30. Granulometría del material reciclado	96
Figura 31. Correlación entre densidad y humedad.....	99
Figura 32. Correlación entre densidad y temperatura.....	99
Figura 33. Variación de la densidad medida con el PQI en muestras secadas en estufa en laboratorio.....	102
Figura 34. Variación de la densidad con el contenido de humedad en la mezcla.....	103

Figura 35. Relación entre la humedad medida por el equipo y el porcentaje real de humedad	103
Figura 36. Distribución de frecuencias y valores medios de densidades de testigos por tramos	105
Figura 37. Distribución de frecuencias y valores medios de densidades medidas con nuclear por tramos.....	105
Figura 38. Distribución de frecuencias y valores medios de densidades medidas con PQI por tramos	105
Figura 39. Pantalla de programación del software del Compactador de Segmentos de Rodillo.	107
Figura 40. Cargas por pasada REF-1	109
Figura 41. Cargas procedimiento compactación REF-1	109
Figura 43. Peso de las probetas	110
Figura 42. Determinación densidad probetas.....	110
Figura 44. Deterioros en la probeta	112
Figura 45. Cargas procedimiento de compactación REF-3	114
Figura 46. Cargas procedimiento de compactación REF-4	115
Figura 47. Porcentajes de compactación de las probetas de laboratorio	119
Figura 48. Disposición de testigos en probeta	120
Figura 49. Probeta número 3	120
Figura 50. Compactación testigos laboratorio obra A-351 Écija-Osuna	123
Figura 51. Compactación testigos laboratorio obra A-472	123
Figura 52. Testigos de obra	125
Figura 53. Módulos Testigos de Laborato	129
Figura 54. Módulos laboratorio/Módulos obra A-351 Écija-Osuna.....	129
Figura 55. Módulos testigos laboratorio A-472 Huelva	130
Figura 56. Módulos testigos obra A-472 Huelva	131
Figura 57. . Módulos laboratorio/obra A-472 Huelva.....	133
Figura 58. Módulos testigos obra / Módulos testigos laboratorio	133
Figura 60. Resistencias T.I. testigos de obra	134
Figura 59. Resistencias T.I. testigos laboratorio.....	134
Figura 61. Resistencias T.I. testigos laboratorio y testigos obra frente a su densidad.....	135
Figura 62. Resistencias a T. I. en seco.....	135
Figura 63. Resistencias a T.I. en húmedo	135
Figura 64. Medias resistencias grupos seco y húmedo.....	136
Figura 65. Resultados del ensayo de Sensibilidad al agua	136
Figura 67. Tracciones Indirectas Testigos Obra.....	137
Figura 66. Relación T.I. / Densidad Testigos Laboratorio.....	137
Figura 68. . Relación T.I. / Densidad Testigos Obra.....	138
Figura 69. Resistencias T.I. testigos laboratorio / testigos obra	138

Figura 70. Relación T.I. Testigos laboratorio - T.I. Testigos obra 139

Figura 71. Resistencias T.I. - Densidad en testigos de laboratorio y obra 139

Figura 72. Ley de fatiga material reciclado 140

Figura 73. Sección firme definitivo..... 142

1 INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El firme de una carretera ha de proporcionar una conducción cómoda y segura al usuario. Una vez que una infraestructura viaria ha sido ejecutada comienza la fase de “explotación”. En esta fase se desarrollan dos tipos de actividades: unas dirigidas al servicio que presta la carretera y otras dirigidas al mantenimiento de la propia infraestructura. Mientras que las primeras están relacionadas con la vialidad, la información a los usuarios, y el uso de la carretera, las segundas, las labores de conservación, incluyen intervenciones físicas sobre la infraestructura cuyo objetivo es preservar el patrimonio viario y mantener las características iniciales del pavimento, ya que las mezclas bituminosas que conforman sus capas superiores se van deteriorando por la acción conjunta del tráfico y las condiciones climáticas.

Estas actuaciones de conservación se dividen a su vez en dos, por un lado las de pequeña entidad como son bacheos, sellado de grietas, fresados localizados..., y por otro, rehabilitaciones a las que se recurre cuando el grado de deterioro de la carretera es mayor y suponen intervenciones de mayor envergadura.

Las rehabilitaciones de un firme incluyen actuaciones de carácter extraordinario, a menudo de aplicación general en un tramo de longitud apreciable y cuyo objetivo es un aumento significativo del índice de estado o de comportamiento de un firme. Puede referirse a las características superficiales, tratándose entonces de rehabilitaciones o renovaciones superficiales del pavimento, o a las características estructurales.

Las rehabilitaciones estructurales se pueden llevar a cabo mediante un refuerzo o recrecimiento del firme. Esta técnica consistente en extender sobre el firme antiguo una o varias capas de materiales nuevos con espesor suficiente para producir un aumento significativo de la capacidad estructural. En ocasiones, el mero recrecimiento presenta el inconveniente de que los deterioros de las capas antiguas son de tal magnitud que acaban reflejándose en superficie en poco tiempo, salvo que se recurra a espesores muy importantes de refuerzo.

Otra técnica de rehabilitación consiste en fresar una o varias capas del firme, para, a continuación, reponer el espesor eliminado. De esta manera el recrecimiento es menor y se evitan problemas de gálibo que en algunas ocasiones se pueden presentar. El fresado previo al recrecimiento tiene además la gran ventaja de poder rehabilitar de manera diferente zonas con distinto grado de deterioro, por ejemplo, los distintos carriles de una misma calzada de una autopista. El fresado de pavimentos genera un residuo que ha de ser trasladado a vertedero.

Una tercera técnica y que solventa los inconvenientes de las anteriores es el reciclado de firmes. Consiste en la reutilización de los materiales de las capas degradadas en la fabricación de nuevas mezclas bituminosas. Con esta práctica se elimina el problema del vertido del residuo generado al fresar los pavimentos. El tratamiento de los materiales reciclados se puede hacer en el mismo sitio en el que se encuentran, denominándose entonces, reciclados in situ, o transportándolos a una central, donde tras un proceso de tratamiento y clasificación, son introducidos en el ciclo de fabricación de una nueva mezcla. En ambos casos, en función de la temperatura de trabajo los reciclados se pueden dividir en frío o en caliente.

Las técnicas de reciclado tuvieron un desarrollo tardío en España, pero en los últimos años su uso se ha acelerado. En la década de los 80 comenzaron a introducirse de forma tímida con reciclado en caliente sobre la propia carretera, pero la experiencia no dio unos resultados todo lo buenos que se esperaban. En los primeros años 90, se inicia la aplicación de técnicas de reciclado en frío con emulsión y con cemento, y se ponen de manifiesto las ventajas de distinta índole que presenta esta técnica de rehabilitación.

El reciclado in situ en frío con emulsión es una técnica en la que se reutiliza el cien por cien del material del firme deteriorado. Se realiza con equipos específicos multifunción que fresan el material, lo mezclan con agua y emulsión y lo extienden, realizándose todo este proceso a temperatura ambiente convirtiendo un firme deteriorado en una capa de base o intermedia totalmente regenerada. El refuerzo necesario a continuación se puede limitar a una capa de rodadura de pequeño espesor.

Hasta el año 2002 no existe normativa que regule los reciclados de firmes. En ese año se aprueba la Orden Circular 08/2001 (Ministerio de Fomento, 2002) en la que se incluyen tres artículos sobre reciclado de firmes que son de aplicación en los Pliegos de Prescripciones Técnicas Particulares para las obras de conservación de carreteras del estado español. El Artículo 20 de dicha orden, especifica las condiciones que se han de cumplir en cada una de las operaciones que constituyen esta técnica. Indica que la dosificación de la emulsión bituminosa se realiza en base a las resistencias obtenidas en el ensayo de Inmersión-Compresión, recogido en la norma NLT-162 (CEDEX, 2000). Este método, que se utiliza para medir la susceptibilidad al agua fue sustituido en el año 2008 por el ensayo de Sensibilidad al Agua, especificado en la UNE-EN 12697-12 (AENOR, 2008), tras la entrada en vigor del Mercado CE de mezclas bituminosas. En lo referente a los reciclados in situ en frío no se ha llevado a cabo ninguna sustitución de ensayos en el proceso de diseño de la mezcla, es decir, que aunque para mezclas bituminosas en caliente no se utilice la NLT-162 para medir la susceptibilidad del agua, en los reciclados sí se sigue aplicando este método de ensayo para definir el porcentaje óptimo de ligante y verificar la fórmula de trabajo durante su ejecución.

La fórmula de trabajo de la mezcla reciclada, establece como primer paso la determinación del contenido óptimo de fluidos mediante el ensayo Próctor Modificado según la UNE

103501 (AENOR, 1994) aplicado al material fresado. Una vez determinada la humedad de aportación a la mezcla, se estudia la cantidad de emulsión a añadir. Partiendo de distintos porcentajes de emulsión añadidos al material fresado (RAP), se ensayan las probetas mediante el ensayo de Inmersión-Compresión y se decide el porcentaje óptimo de ligante con el que se cumplan las prescripciones mínimas exigidas en el Artículo 20. A continuación se procede a la ejecución de obra, comprobando periódicamente la dosificación del material reciclado a través del ensayo de contenido de ligante y realizando el ensayo de Inmersión-Compresión para verificar la resistencia determinada en la fórmula de trabajo.

La singularidad de esta tecnología es la utilización de emulsión bituminosa como ligante en la fabricación de la mezcla. La emulsión es una dispersión coloidal de partículas de betún en agua que permite su mezcla con el esqueleto mineral (áridos) a temperatura ambiente sin necesidad de calentamiento previo de ningún componente. Cuando la mezcla va perdiendo humedad, las partículas de betún vuelven a entrar en contacto proporcionando al material la cohesión necesaria para cumplir su función conglomerante. Este proceso se conoce como maduración de la emulsión y el primer momento cuando el agua empieza a evaporarse se le denomina rotura de la emulsión (aunque coloquialmente al fenómeno de maduración de la mezcla se le suele denominar “curado” de la emulsión). Tras la rotura de la emulsión, la mezcla se va densificando por la acción conjunta del tráfico rodado y de la maduración de la mezcla y alcanzará la densidad máxima cuando el material haya perdido toda su humedad. Llegado este momento, se podrán extraer testigos en obra para la determinación de la densidad. La densidad está condicionada por la pérdida de humedad y no se podrá determinar hasta pasado un tiempo tras su puesta en obra. Este tiempo dependerá de diversos factores como son las condiciones meteorológicas, situación geográfica, características de los áridos y del ligante, circulación que soporta la carretera después de abrir el paso al tráfico. Todo este proceso queda resumido en la Figura 1

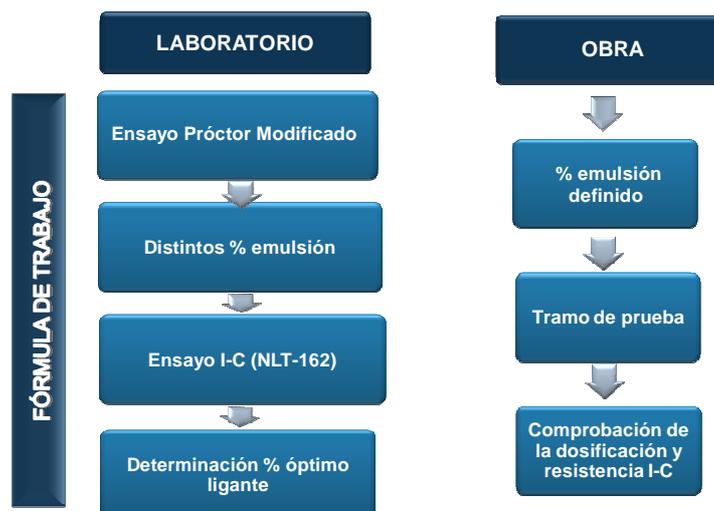


Figura 1. Proceso ejecución reciclado in situ con emulsión

La densidad exigida en obra es el 100% de la densidad Próctor Modificado establecida en laboratorio. Esta densidad se determina en probetas elaboradas mediante compactación por impactos, y siempre va a ser menor que la obtenida en el ensayo de Inmersión-Compresión en el que se aplica una compactación estática de 170 kN para fabricar las probetas.

Las densidades alcanzadas en obra, determinadas en laboratorio mediante el método de superficie saturada seca recogido en la UNE-EN 12697-6 (AENOR, 2003), son más bajas que las obtenidas en el ensayo de Inmersión-Compresión en el laboratorio. Esta es una de las deficiencias del reciclado in situ en frío con emulsión, se diseña una mezcla en laboratorio con una densidad que no se alcanza nunca en obra.

La densidad y humedad del material desde su extensión hasta que la mezcla ha perdido toda su humedad son parámetros que se desconocen al no existir ningún método de determinación de densidad in situ exacto para materiales de estas características. La densidad del material reciclado en obra, se realiza en laboratorio sobre testigos extraídos del pavimento una vez que ha perdido toda la humedad. La operación de extracción del testigo no se puede llevar a cabo con la muestra húmeda ya que el material se desmorona.

De todo lo expuesto, se deduce la necesidad de reproducir en laboratorio un material reciclado con emulsión semejante al ejecutado en obra para poder determinar sus características mecánicas y analizar el comportamiento que presentará una vez que entre en servicio.

Si además se consideran las numerosas ventajas de los reciclados in situ en frío y que en España, y concretamente en Andalucía, se cuenta con unas buenas condiciones climáticas, con períodos estivales prolongados y un elevado número de horas de radiación solar, queda justificada la investigación desarrollada en esta Tesis Doctoral.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal definido en este trabajo de investigación, tras conocer las limitaciones de la técnica presentadas en el apartado anterior, es reproducir un material reciclado en laboratorio de las mismas características que el obtenido en el proceso de reciclado in situ, mediante la determinación de un procedimiento de compactación con el compactador de segmentos de rodillo, que permita fabricar probetas con densidades iguales a las alcanzadas en obra.

De esta objetivo principal se derivan una serie de objetivos específicos que se presentan a continuación.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El primer parámetro que se necesita conocer es la densidad del material reciclado en obra. Hasta la fecha, la densidad del material reciclado se determina en laboratorio sobre testigos extraídos del pavimento mediante el ensayo de superficie seca saturada una vez que la mezcla ha perdido la humedad. Por lo tanto, el **primer objetivo específico** es contrastar un método de determinación de densidad del material reciclado in situ y de forma inmediata para poder reproducirlo en laboratorio.

El **segundo objetivo específico** derivado del principal es determinar un procedimiento de compactación en laboratorio que permita fabricar muestras con densidades lo más cercanas posibles a las obtenidas en obra.

El **tercer objetivo** planteado es estudiar el comportamiento de ese material reproducido en laboratorio ante ensayos de caracterización mecánica, como el módulo dinámico, la resistencia a la tracción indirecta y la resistencia a la fatiga, comprobando su correlación con el comportamiento del material realmente obtenido en obra.

1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL

En este epígrafe se describe de forma breve y concisa el contenido de esta Tesis Doctoral.

En el capítulo 2, tras la revisión bibliográfica, se presenta el estado del arte de la tecnología de reciclado in situ con emulsión bituminosa. En primer lugar se realiza un estudio general de los aspectos más relevantes de la conservación de firmes de carreteras, describiendo a

continuación los métodos de rehabilitación de firmes más utilizados. Seguidamente se expone el panorama general sobre reciclado de pavimentos asfálticos. Se profundiza en la tipología del reciclado in situ en frío, señalando las ventajas y las limitaciones de la técnica y describiendo su evolución a nivel nacional e internacional. Más adelante se desarrollan las características de los materiales y equipos empleados, para terminar detallando todas las fases de estudio, diseño y ejecución de esta técnica de rehabilitación.

En el capítulo 3 se explica la metodología utilizada en toda la investigación, especificando cada una de las etapas seguidas y ensayos realizados para la consecución de los objetivos propuestos. En primer lugar se presentan los casos concretos de estudio (obras en ejecución) que han servido como punto de partida para esta investigación y se estudia un nuevo método de determinación de la densidad in situ en obra. A partir de ahí comienzan los trabajos de laboratorio con una primera fase de estudio de un procedimiento de compactación en laboratorio para materiales reciclados con emulsión y una segunda fase de caracterización del material fabricado mediante el procedimiento definido en la fase anterior.

En el siguiente capítulo se analizan los resultados obtenidos en esta investigación, siguiendo el mismo orden que el detallado en la metodología.

En el capítulo 5 se exponen las conclusiones obtenidas y en el último, el capítulo 6, se detallan las referencias bibliográficas empleadas a lo largo del desarrollo de este trabajo.



2 ESTADO DEL ARTE

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN

Durante el desarrollo de este capítulo se llevará a cabo un estudio del estado del arte de la técnica del reciclado de firmes in situ en frío con emulsión bituminosa.

En primer lugar se resumirán las distintas técnicas de rehabilitación de firmes utilizadas en las labores de conservación de carreteras, destacando la problemática que supone el vertido de los materiales fresados de los firmes deteriorados en algunas de estas actuaciones. En segundo lugar se describirá la evolución en la gestión de los residuos de construcción y demolición que ha impulsado la reutilización de unos materiales que terminaban en vertedero y que en muchos casos podían presentar una calidad apta para su incorporación en procesos de fabricación de nuevas unidades de obra. Tal es el caso de los reciclados de firmes que se desarrollan en el punto descrito a continuación; los materiales procedentes de firmes degradados son incorporados en algún momento, dependiendo de la clase de reciclado que se trate, a la cadena de fabricación de nueva mezcla bituminosa.

A continuación se detalla minuciosamente la técnica del reciclado in situ en frío con emulsión que es en la que se centra esta investigación. En este punto se destacan las ventajas y limitaciones que presenta esta práctica. Se señala la normativa técnica de aplicación encontrada en la bibliografía estudiada. Se describe con detalle los distintos materiales que conforman un reciclado de este tipo y se explican los procedimientos seguidos para el dimensionamiento de firmes con capas recicladas.

Se expone seguidamente el procedimiento de construcción a través de todas las etapas que hay que seguir desde que se elige esta técnica como mejor opción de rehabilitación, detallando los equipos y maquinaria utilizados en las operaciones de reciclado y compactación.

Para terminar este capítulo se relatan las distintas experiencias encontradas en el estudio bibliográfico relacionadas con la aplicación de esta técnica y los proyectos de investigación recientes que impulsan el desarrollo de los reciclados.

De todo lo revisado en este capítulo se recopilan unas consideraciones finales que justifican el desarrollo de este trabajo de investigación y reafirman los objetivos planteados en el capítulo anterior.

2.2 TÉCNICAS DE CONSERVACIÓN Y REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Las carreteras son el principal medio de desplazamiento de viajeros, y la vía principal para la distribución de mercancías. Al conectar núcleos de población y de producción con grandes ciudades en una sociedad que intercambia más bienes y servicios, la importancia de las carreteras se ha incrementado notablemente, convirtiéndose en verdaderas vías que impulsan la competitividad de la economía y, también, el desarrollo social.

El objetivo fundamental de los firmes de carreteras es prestar a los usuarios un servicio de calidad que satisfaga sus necesidades de movilidad. Para ello, una vez creada la infraestructura, hay que realizar una serie de actividades de conservación. Atkinson (1994) define la “conservación” como una serie de actuaciones necesarias para mantener los componentes iniciales de una carretera en un aceptable estado de servicio. Son dos los objetivos generales que tienen que cumplir estas actuaciones: el primero de ellos se dirige a asegurar una circulación segura, fluida y cómoda y el segundo trata de la preservación del valor patrimonial de las carreteras, ya que como bienes demaniales forman parte del Patrimonio de las Administraciones Públicas.

El firme de una carretera está compuesto por una serie estratos horizontales de materiales de distinta naturaleza, que en el caso de firmes flexibles y semiflexibles, tienen al menos una capa de rodadura bituminosa. Los materiales bituminosos que componen un firme, han de ser capaces de soportar las cargas y resistir las tensiones producidas con unas deformaciones tolerables. Esta propiedad se denomina estabilidad y representa la resistencia intrínseca del material, es decir, la combinación de su rozamiento interno y de su cohesión.

Además de la estabilidad, las mezclas bituminosas deben presentar otras características muy importantes entre las que se pueden mencionar la resistencia a las deformaciones plásticas, resistencia a la disgregación, resistencia a la fatiga, flexibilidad, una adecuada resistencia al deslizamiento, impermeabilidad en el caso de las mezclas cerradas y permeabilidad en el caso de las drenantes y una resistencia adecuada a los agentes externos (durabilidad).

Todas las características que deben cumplir las mezclas bituminosas, deben ser estudiadas durante su diseño y controladas adecuadamente durante su fabricación y puesta en obra, para garantizar la calidad de los firmes en los que serán utilizadas. (Kraemer et al., 2004)

Por acción del tráfico y de los agentes atmosféricos los pavimentos asfálticos van perdiendo su capacidad estructural y su calidad de servicio. Las operaciones de mantenimiento y conservación tienen como finalidad reparar los pequeños defectos estructurales o funcionales del firme, o rehabilitar y mejorar su estado cuando sus condiciones estructurales o funcionales no son adecuadas con los niveles de servicio y prestaciones previstos. Es

necesario, por tanto, invertir en estas actuaciones para mantener las características iniciales del firme ya que la insuficiente conservación de las redes de carreteras, termina por ocasionar sobrecostes en los usuarios de la vía (Vasallo Magro, 2001).

El fallo o deterioro del firme puede ser por tanto funcional y/o estructural y las operaciones de conservación habrán de ser fijadas en función del estado del firme y los niveles de servicio y prestaciones previstas tras su rehabilitación. Éstas pueden ser dirigidas por tanto, a reparar pequeños fallos y/o mejorar las características funcionales del firme (actuaciones sin aportación estructural) o a mejorar conjuntamente su capacidad estructural y su estado funcional (refuerzo de pavimentos asfálticos). (Yoder et al., 1975)

La siguiente gráfica (Figura 2) expresa de forma clara el proceso de deterioro de una carretera con el paso del tiempo y el efecto que en ella producen los tratamientos de rehabilitación superficial y rehabilitación estructural, en función de la calidad de rodadura.

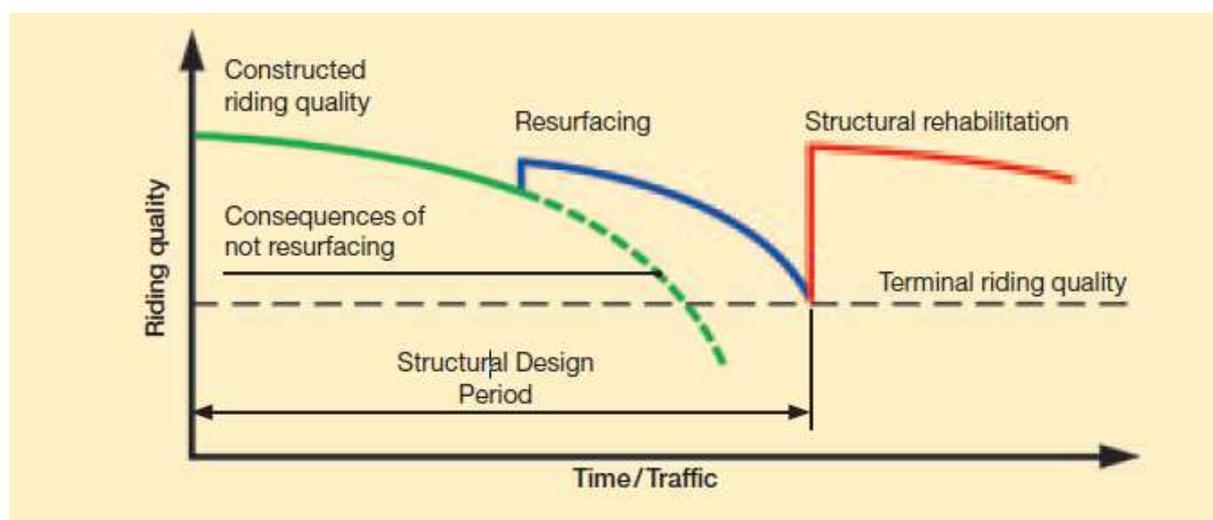


Figura 2. Proceso de deterioro y conservación de un firme
Fuente: Manual Reciclados en frío Wirtgen. 2010

Algunas de las actuaciones ordinarias de conservación que se llevan a cabo con más frecuencia en los firmes asfálticos son los bacheos, saneamiento de blandones, reparación de bordes, sellado de grietas y juntas, eliminación de exudaciones y fresados localizados

En un segundo nivel de la conservación se sitúan, como se ha mencionado anteriormente, las rehabilitaciones. En general,

El segundo nivel de conservación lo ocupan las rehabilitaciones, a las que se recurre cuando el paso del tráfico y las acciones climáticas han provocado una disminución apreciable de las características iniciales o cuando se quiere hacer frente a nuevas solicitudes no contempladas con anterioridad.

Históricamente, las rehabilitaciones estructurales se llevan a cabo mediante un refuerzo o recrecimiento del firme. Es una técnica consistente en extender sobre el firme antiguo una o varias capas de materiales nuevos con espesor suficiente para producir un aumento significativo de la capacidad estructural.

En ocasiones, el mero recrecimiento presenta el inconveniente de que los deterioros de las capas antiguas son de tal magnitud que acaban reflejándose en superficie en poco tiempo, salvo que se recurra a espesores muy importantes de refuerzo. Por esa razón puede resultar conveniente fresar una o varias capas del firme, para a continuación reponer el espesor eliminado, antes de proceder a un recrecimiento que lógicamente será de menor espesor que si no se hubiera fresado. El fresado previo al recrecimiento tiene además la gran ventaja de poder rehabilitar de manera diferente zonas con distinto grado de deterioro, por ejemplo, los distintos carriles de una misma calzada de una autopista.

El fresado de pavimentos genera un residuo de construcción que es necesario gestionar como tal. El crecimiento y desarrollo económico ha dado lugar a un incremento en la producción de residuos que ha sido necesario regular y controlar para evitar daños medioambientales. Las políticas de protección y sostenibilidad impulsan la reutilización de residuos que pueden volver a formar parte del proceso de producción de la materia de la que provienen.

Tal es el caso de los residuos de construcción y demolición, que han pasado de ser trasladados a vertederos de inertes, a ser reutilizados como materiales de menor calidad en distintas unidades de obra, iguales o distintas de las que proviene el residuo.

2.3 RESIDUOS DERIVADOS DE LAS ACTIVIDADES DE CONSERVACIÓN Y REHABILITACIÓN DE FIRMES DE CARRETERAS

La gestión de residuos ha evolucionado de manera muy significativa en los últimos años, aunque la gestión de residuos no es un problema nuevo. A la civilización romana se le debe la aparición de sistemas de alcantarillado y vertederos en las afueras de los núcleos de población para acumular la basura. Los residuos han ido aumentando con el desarrollo económico-social y con la llegada de la revolución industrial a finales del siglo XVIII y principios del XIX, los problemas con los residuos se multiplicaron, debido principalmente al importante incremento de la población (y por tanto de los residuos) y a la diversificación de las actividades realizadas (aparecen un gran número de nuevas industrias y con ellas de nuevos residuos). Este hecho trajo consigo la necesidad de establecer mejoras en la gestión de los residuos y el empleo de nuevas tecnologías para optimizar su tratamiento. En la

segunda mitad del S.XIX aparecen las primeras incineradoras, planes de gestión de residuos y tratamiento de aguas, pero a pesar de ello, las epidemias siguieron haciendo estragos debido a las precarias condiciones de la salud pública.

El continuo crecimiento dio paso a una sociedad de consumo, en la que la cantidad y variedad de residuos generados creció exponencialmente, alcanzándose las mayores cotas en la segunda mitad del S.XX.

La mejora en la gestión y el empleo de nuevas tecnologías para optimizar su tratamiento, supusieron el inicio de un movimiento social e institucional cada vez más amplio. Este movimiento generó la creación de textos legislativos para la regulación de residuos y la aparición de nuevos conceptos y principios como “sostenibilidad”, o el principio de las “3 erres” (Reducir, Reciclar y Reutilizar), los cuales han contribuido a dar el giro definitivo para reducir la producción y acumulación de residuos. Con la aparición de esta conciencia social, los gobiernos e instituciones de los diferentes países se esfuerzan por realizar una gestión eficiente de los recursos naturales y de los residuos que se generan con el objetivo principal de la eliminación total de los mismos mediante actuaciones de reutilización.

Actualmente, la gran mayoría de los países se encuentran muy lejos de este objetivo “residuo cero”. Según datos estimados por la Organisation for Economic Co-operational and Development (OECD, 2011), en el mundo se generan más de 10.000 millones de toneladas de residuos cada año. Solo en la Unión Europea, se generan casi 2.000 millones de toneladas (Unión Europea, 2011). España genera más de 60 millones de toneladas de residuos al año según el Instituto Nacional de Estadística (INE, 2011). Las directrices seguidas en la gestión de residuos han ido evolucionando a lo largo de los años, pasando del empleo de acciones paliativas, cuya finalidad es tratar de disminuir los efectos provocados por los residuos, al de preventivas, las cuales se esfuerzan por evitar que dichos residuos aparezcan. En base a esto, actuaciones como el almacenamiento o la destrucción (tradicionalmente utilizadas como actuaciones de gestión de residuos), han dejado de ser eficientes desde el punto de vista ambiental, viéndose sustituidas por nuevas actuaciones cuyo objetivo principal es la reinserción del residuo en el ciclo de producción mediante el reciclado de sus componentes. El producto no solo ha de servir para satisfacer las necesidades para las que ha sido creado, sino que además en su concepción se deben integrar los aspectos necesarios que faciliten su destino después de su vida útil.

Una de las actividades que mayor cantidad de residuos genera es la construcción. La imposibilidad de depósito de sus residuos en vertederos, unida al incremento de los costes energéticos, ha reforzado el desarrollo de tecnologías constructivas más sostenibles en las que se premia el empleo de materiales reciclados.

Los residuos procedentes de la construcción son los que presentan el mayor potencial para volver a ser reutilizados en otros procesos constructivos como materiales de menor calidad.

Así, elementos como el hormigón, plásticos, aceros, maderas, restos de albañilería, papel y cartón pueden convertirse en materiales reciclados para construcción. (Tam et al., 2006).

Por su parte, el importante desarrollo económico y social sufrido en las últimas décadas, ha motivado un incremento considerable de la demanda de carreteras, y con ellas, del consumo de áridos. La disminución del número de canteras, debido al incremento de las trabas impuestas por la legislación ambiental que hacen cada vez más difícil su explotación, ha provocado la escasez de estos materiales, incrementado considerablemente los costes de construcción y mantenimiento de las carreteras. En este sentido, la incorporación de materiales reciclados en la construcción de carreteras como sustitución de los áridos vírgenes, se percibe como una oportunidad para ahorrar recursos naturales y disminuir el impacto asociado con la extracción y transporte de éstos. Los grandes volúmenes de material empleados en la construcción de carreteras (más de 12.000 ton/kilómetro de autovía), las convierten en áreas potenciales de reutilización de residuos, (Sherwood, 1995; Hosking, 1992). Así, los beneficios obtenidos de esta operación no son sólo la disminución de residuos en vertederos, sino también la reducción de impactos medio ambientales debidos a la explotación de las canteras y el transporte de áridos.

El papel que pueden desarrollar los residuos dentro del conjunto de la carretera como sustitutivos de los áridos naturales puede variar. De esta manera, podemos encontrar residuos tanto en terraplenes (Lee et al., 1999) y capas granulares (Poon et al., 2006; Cadenas et al., 2007) , como formando parte de las mezclas asfálticas que constituyen el firme, ya sea en forma de grava, arena o filler (FHWA, 1997).

Según datos de la EAPA (European Asphalt Pavement Association), en Europa, en el año 2009 se fabrican alrededor de 327 millones de toneladas de mezclas bituminosas en caliente cada año, siendo la aportación de España de unos 39 millones de toneladas fabricadas. Los áridos suponen más del 90% en peso de las mezclas bituminosas lo que se traduce en un consumo de unas 295 millones de toneladas de áridos en Europa, y de 35 millones de toneladas en nuestro país, sólo en la fabricación de mezclas bituminosas. Si extrapolamos estos cálculos al resto del mundo (sólo en EE.UU se fabrican anualmente unos 374 millones de toneladas de mezclas bituminosas en caliente, lo que se supone un consumo de 336 millones de toneladas de áridos), los datos obtenidos resultan más que alarmantes.

El desarrollo de procedimientos que minimicen el impacto de esta actividad sobre el medio ambiente se convierte por tanto, en una necesidad primordial.

Son muchos los estudios que analizan la posibilidad de incorporar residuos a las mezclas bituminosas como sustitutos parciales o totales de los áridos naturales. Materiales como escorias de acero, residuos de vidrio o plásticos son susceptibles de ser utilizados en pavimentos asfálticos. (Huang et al., 2007). El caucho procedente de los neumáticos fuera de uso, tratado y triturado hasta fracciones milimétricas, se puede utilizar tanto para modificar

las características del ligante utilizado como sustituto de la fracción mineral de igual granulometría de la mezcla bituminosa. (Moreno et al., 2010)

Los residuos de piedra ornamental producidos por la fábrica de Silestone© también han sido estudiados para formar parte en la composición de mezclas bituminosas (Moreno et al., 2011).

El fresado de pavimentos en las actuaciones de rehabilitación produce una gran cantidad de residuos con un elevado potencial de reutilización. Los reciclados de firmes, basados en la reutilización de estos residuos en la construcción de nuevas mezclas bituminosas son técnicas amigables con el medioambiente y económicamente viables, lo que las hace imprescindibles en los estudios de conservación y rehabilitación de carreteras.

2.4 RECICLADO DE FIRMES

El reciclado es una técnica de rehabilitación que consiste en la reutilización de los materiales procedentes de los firmes que han estado en servicio: materiales deteriorados que han perdido en gran parte sus propiedades iniciales o materiales aún en condiciones de servir cuyas características se desea mejorar. Es una técnica relativamente antigua que en los últimos años ha experimentado un fuerte impulso. El reciclado de los pavimentos asfálticos presenta una respuesta adecuada al reto que representan la creciente escasez de áridos y la dificultad cada vez mayor de enviar a un vertedero unos residuos que se pueden reutilizar. Al reciclar las capas bituminosas se aprovecha el ligante que contienen y se logra disminuir el consumo de betún. Se reducen también los volúmenes de vertido, que en algunos países es una práctica casi imposible, debido a la falta de espacio y a las fuertes regulaciones relacionadas con el medioambiente. Estas ventajas han hecho que el reciclado se haya convertido en una alternativa de gran interés, cada vez más utilizada, en conservación y rehabilitación de firmes de carreteras. (Gambatese, 2005; Damp, 2007; Cross, 2011)

Según los datos de la European Asphalt Pavement Association (EAPA, 2011), en el año 2010, fueron muchas las toneladas de material reutilizado en reciclado de firmes, en todas sus modalidades, tal y como se aprecia en la

Tabla 1.

Country	Available reclaimed asphalt	% of available reclaimed asphalt used in				% of the new hot and warm mix production that contains reclaimed material
		Hot and warm recycling	Half warm recycling	Cold recycling	Unbound layers	
Austria	500.000	80		8	12	
Belgium	1.500.000	57				47
Czech Republic	1.650.000	15		35	20	10
Croatia	75.000			35		
Denmark	350.000	56			44	39
Finland	1.000.000					65
France	7.080.000	40	No data	No data	No data	No data
Germany	14.000.000	82			18	60
Greece	0	0	0	0	0	0
Great Britain	4.000.000					
Hungary	44.580	12		15	40	10
Iceland	15.000				25	2,5
Ireland	100.000	40	0	0	60	2,0
Italy	11.000.000	20				
Luxembourg	200.000					
Netherlands	4.000.000	75				67
Norway	750.000	15	13	12	60	8
Poland	110.000	4				0,2
Portugal	2.100	15	0	5	20	25
Romania	40.000	40	15	20	25	<5
Slovenia	26.160		30	20	50	
Spain	1.590.000	56	9	16	19	11
Sweden	1.100.000	70	5	5	20	60
Switzerland	1.450.000	52	19	18	11	21
Turkey	2.420.000	19			81	10
Japan						72,9
U.S.A.	66.500.000	84			12	
Ontoria-Canada	4.000.000	85			15	85

Tabla 1. Datos de reciclado de firmes. Fuente: Asphalt in Figures, EPA 2011

Las distintas técnicas de reciclado se clasifican en diferentes categorías en función de la temperatura de trabajo y de la ubicación donde se realice (Karlsson et al., 2006). De esta manera se pueden distinguir los siguientes tipos de reciclados que se describen a continuación:

- Reciclado en planta en caliente
- Reciclado in situ en caliente

- Reciclado en planta en frío
- Reciclado in situ en frío con cemento
- Reciclado in situ en frío con emulsión

2.4.1. Reciclado en planta en caliente

Se entiende por “Reciclado de Pavimentos Asfálticos en Caliente en Planta” al proceso mediante el cual los materiales recuperados de capas bituminosas de firmes deteriorados o de mezclas nuevas que no han sido utilizadas por ser un excedente o por no haber cumplido con las especificaciones de proyecto, son mezclados con árido virgen, betún nuevo y/o agentes rejuvenecedores, en las proporciones adecuadas, para producir nuevas mezclas en caliente que cumplan con los requerimientos de calidad, resistencia y durabilidad exigidos para el tipo de capa en que serán utilizados. (Kraemer et al., 2004)

El proceso de reciclado de pavimentos asfálticos en planta en caliente consiste básicamente, en retirar las capas bituminosas de los firmes envejecidos mediante el fresado o demolición, para transportar dicho material a una central de fabricación en la que es acopiado, caracterizado y eventualmente procesado, hasta cumplir con ciertas condiciones de tamaño, humedad etc. A continuación es mezclado en caliente con áridos vírgenes, betún nuevo y/o agentes rejuvenecedores, para obtener una mezcla bituminosa compuesta en parte por material reciclado que es colocada y compactada en obra como si se tratara de una mezcla convencional.

De acuerdo con la "Asphalt Recycling Guide" de Austroads (1997), se puede decir que, en general, el 100% de los materiales recuperados de pavimentos deteriorados son susceptibles de ser reciclados, ya sea en la misma obra en la que son generados, en otro pavimento (práctica más habitual) o con propósitos diferentes a la fabricación de firmes.

El material recuperado de pavimentos asfálticos conocido como RAP, por su terminología en inglés “Reclaimed Asphalt Pavement”, es el elemento más importante en esta técnica, ya que tiene una gran influencia sobre las características del producto final. Se trata de un material con un elevado potencial de reutilización que termina en vertedero si no se procede a su reciclado (Carvalho et al., 2010). La primera consideración a la hora de realizar la fórmula de trabajo de una mezcla reciclada es estudiar los materiales básicos de dicha mezcla, empezando precisamente por el RAP que es el más importante. Aunque existen numerosos métodos de ensayo para la formulación de mezclas recicladas, en la mayoría de los países se utiliza el método Marshall, como es el caso de España, en donde la formulación de este tipo de reciclados queda recogida en el Artículo 22 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales Para Obras de Conservación de Carreteras, PG-4 (Ministerio de Fomento,

2002). Una vez obtenidas las propiedades de los materiales constitutivos, se puede formular la mezcla que responda a las exigencias requeridas.

Para asegurar una buena consecución de la fórmula de trabajo, es conveniente vigilar los procesos de ejecución de los ensayos para evitar, en especial el calentamiento de los áridos reciclados o la duración de la amasada.

En el proceso de fabricación hay que ajustar las características del ligante viejo del RAP, y mezclarlo con la cantidad correcta de un nuevo ligante de propiedades adecuadas. Este nuevo ligante ayudará a recuperar las características perdidas del betún envejecido contenido en el material fresado y permitirá cumplir con el contenido de ligante exigido para el tipo de capa del que se trate. Este proceso es viable según Bardesi y Echevarría (2001) gracias a que en el proceso productivo, en diversas formas según la técnica de reciclado en caliente empleada, la mezcla antigua se debe calentar hasta que el ligante antiguo adquiera una consistencia suficientemente baja para poder disgregar totalmente la mezcla antigua. En estas condiciones, y asumiendo un sistema y un tiempo de mezclado de los diversos componentes suficientemente eficaz, debe ser posible obtener una mezcla íntima entre el ligante antiguo y el de aportación de forma que se obtenga un ligante final homogéneo.

La cantidad y tipo de ligante nuevo a utilizar se determinará a partir del análisis del contenido y características del betún aportado por el RAP. Los betunes de penetración convencionales son los más usados en la fabricación de mezclas recicladas en planta en caliente y deberán cumplir con los mismos requerimientos de calidad que se exigen para las mezclas convencionales.

Si el contenido de RAP en la nueva mezcla es muy elevado o si el ligante contenido en el RAP tiene una penetración muy baja, se suele aplicar un agente rejuvenecedor que nos ayude a lograr la penetración adecuada restaure las características químicas óptimas de durabilidad del betún del RAP.

Los agentes rejuvenecedores son divididos por la Federal Highway Administration (2000,a) en tres grupos principales: cementos asfálticos muy blandos, aceites aromáticos y aceites parafinados, todos ellos derivados del proceso de destilación del petróleo.

De acuerdo con Bardesi y Echevarría (2001), los agentes rejuvenecedores deberían reunir las siguientes propiedades:

- Viscosidad adaptable a las necesidades.
- Punto de inflamación compatible con las temperaturas del proceso.
- Contenido elevado en aromáticos de alto peso molecular para facilitar la compatibilidad y restituir la composición inicial.
- Contenido bajo o nulo en asfaltenos y en saturados.
- Coste asumible.

Con estas condiciones uno de los productos disponibles actualmente son los aceites extendedores y plastificantes que en algunas refinerías pueden obtenerse de los procesos de producción de bases lubricantes minerales. Dentro de ellos, los más pesados son los más adecuados ya que permiten su empleo a las temperaturas de fabricación sin necesidad de tomar precauciones especiales que serían precisas en los más ligeros.

Los reciclados en planta en caliente se pueden fabricar en plantas de mezclas asfálticas convencionales adaptadas (Decker, 1997). En función del ajuste e intervención que se realice en la planta se pueden introducir porcentajes de RAP que varían desde un 10% en los casos más básicos hasta un 80% cuando se utilizan técnicas más sofisticadas para modificar las plantas y se realiza una mayor inversión. En estos casos, con altas tasas de reciclado, algunos autores han analizado el comportamiento de estas mezclas obteniendo buenos resultados con porcentajes de RAP de hasta 60% (Valdés et al., 2011; Celauro et al., 2010)

Se presenta a continuación los posibles tipos de plantas en las que se puede fabricar mezclas recicladas en caliente:

a.- Central discontinua sin tambor secador independiente (adición en frío)

Los áridos RAP son añadidos directamente, en la unidad de pesado, a los áridos vírgenes sobrecalentados (hasta los 275° C), en lugar de ser calentados también en el secador (Figura 3). Debido a ello, se forma una gran cantidad de vapor que debe ser evacuado por el sistema de extracción de polvo y la chimenea central. En estos casos, la temperatura máxima se limita con el fin de impedir que se dañe alguna parte de la central.

Normalmente, mediante el uso de este tipo de central, se pueden llegar a incorporar en las mezclas recicladas un porcentaje de un 15% o como máximo 20% de RAP, según el contenido de humedad.

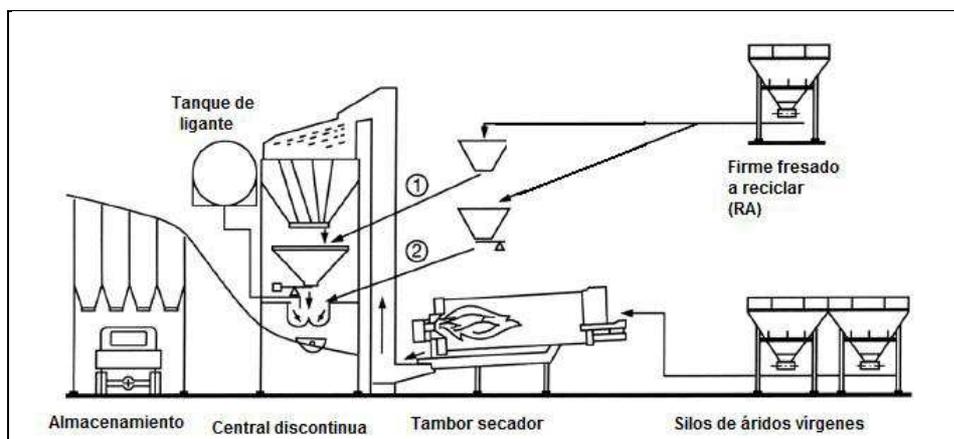


Figura 3. Central discontinua sin calentamiento RAP
Fuente: Comité Technique AIPCR C7/8 – "Recyclage Des Chaussées"

b.- Centrales discontinuas sin tambor secador independiente (calentamiento simultáneo)

El RAP se calienta de forma simultánea que el árido nuevo en un solo tambor secador, provisto de un sistema especial para las adiciones. El RAP es añadido, bien a la mitad del tambor secador, o bien en el extremo donde se encuentra la llama calorífica (flujo inverso). Si el RAP se introduce en el extremo de la llama, el material se mezcla con el árido virgen cerca del final del secador, de manera que el tiempo para el calentamiento es bastante breve. Aplicando el sistema de flujo inverso es posible introducir en las mezclas recicladas niveles del 40% de áridos fresados reutilizados (Figura 4).

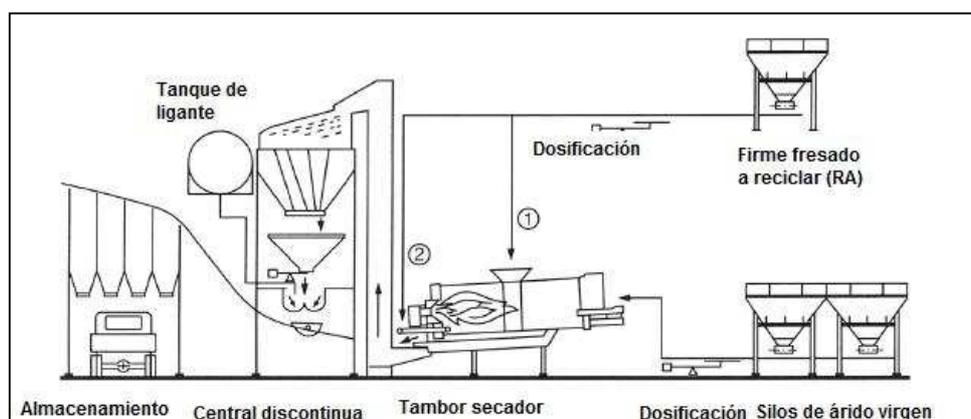


Figura 4. Central discontinua con calentamiento simultáneo de RAP
Fuente: Comité Technique AIPCR C7/8 – "Recyclage Des Chaussées"

c.- Centrales discontinuas con tambor secador independiente (tambor paralelo)

El tambor secador adicional tiene su propio dispositivo para secar el árido fresado y calentarlo hasta los 130° C. Así el árido fresado (RAP), una vez calentado, se transportará hasta la amasadora donde se adicionará el árido virgen ligeramente sobrecalentado, de forma que la temperatura final sea de unos 160° C. (Figura 5)

Añadiendo el RAP seco y precalentado, la cantidad máxima a incorporar a la mezcla puede ser de entre un 50% a un 80%, siempre y cuando se pueda garantizar que el árido fresado es de buena calidad

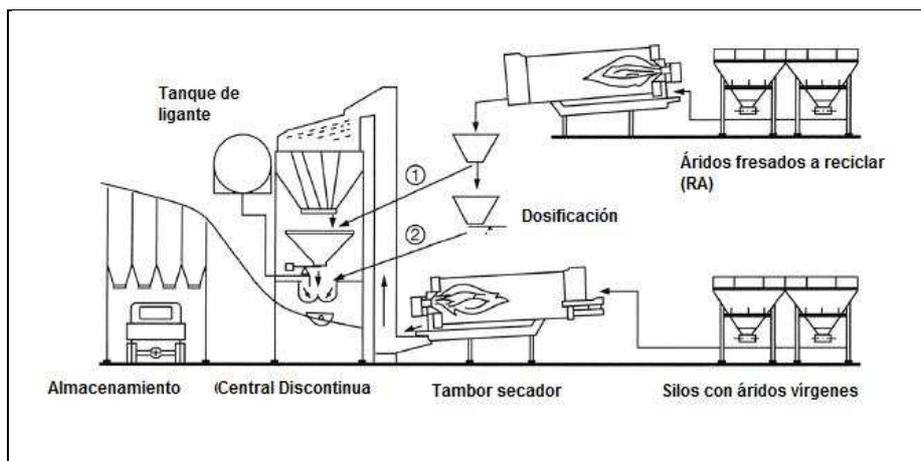


Figura 5. Central discontinua con tambor paralelo
Fuente: Comité Technique AIPCR C7/8 – " Recyclage Des Chaussées"

d.- Tambor secador-mezclador (Central continua)

En general, el RAP se añade en el centro del tambor, lejos de la influencia de la llama del secador, para impedir que se queme el betún que lleva incorporado (Figura 6). En este tipo de centrales, la cantidad máxima de árido fresado a utilizar en la mezcla es del 50%, como en el caso de las centrales discontinuas con tambor secador independiente.

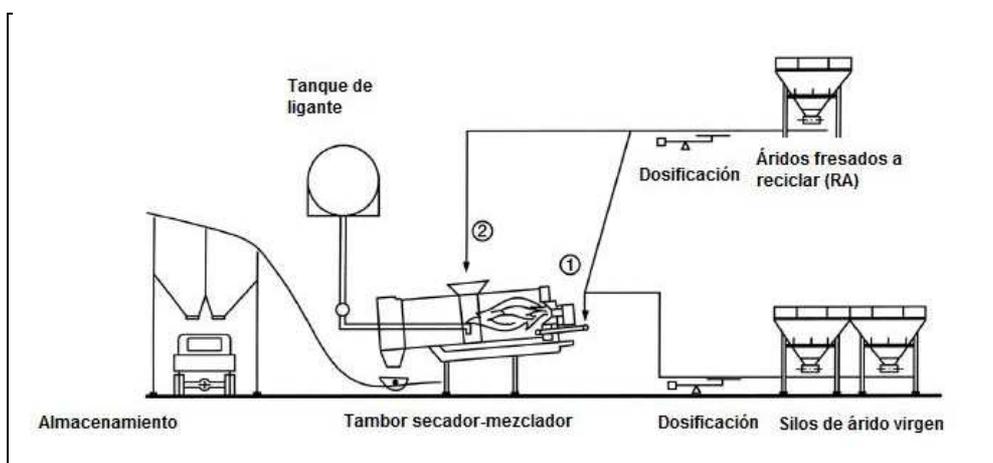


Figura 6. Central continua con tambor secador-mezclador
Fuente: Comité Technique AIPCR C7/8 – " Recyclage Des Chaussées"

2.4.2. Reciclado “in situ” en caliente

Esta técnica de reciclado in situ se realiza mediante calentamiento de la superficie del firme entre 120°C y 160°C para facilitar su disgregación por escarificado (esto evita degradaciones de los áridos y granulometría, como ocurre con el fresado) y se procede a la mezcla y homogeneización posterior del material disgregado y los de adición (ligantes, áridos o mezclas bituminosas). El calentamiento del pavimento a estas temperaturas necesita una técnica especial y cuidada para evitar excesivas emisiones contaminantes y el envejecimiento del betún. Una solución para minimizar este problema, según Carmichael et al. (1997), es calentar una fina capa en superficie y realizar numerosas pasadas. Son tratamientos de la capa de rodadura (3 a 5 cms de espesor) para corregir características superficiales (pulimento de áridos, textura, fisuración por envejecimiento de ligante, regularidad longitudinal o transversal). La limitación en temperatura máxima en superficie (por degradación del ligante y emisión de humos) limita el espesor del tratamiento, por lo que la técnica ve reducida su campo de actuación.

Otra técnica consiste en generar una corriente de aire caliente (a 600°C) e introducirlo en el pavimento, en lugar de calentar directamente la superficie (Terrel et al., 1997). Controlando la combustión se puede controlar el nivel de oxígeno y no se produce una excesiva oxidación en el material. Otra ventaja de esta técnica, es que el aire caliente se puede recircular, lo que supone un ahorro de energía.

2.4.3. Reciclado en planta en frío

La técnica del reciclado en planta en frío consiste en fabricar un mezcla bituminosa a partir del material fresado de un firme (RAP) trasladado a una planta de fabricación continua y utilizando como ligante emulsión o espuma de betún, con eventual adición de cal o cemento y áridos correctores de granulometría. Se obtiene un producto similar a la gravaemulsión. Esta forma de reciclado está muy cerca de la técnica in situ en lo que a condiciones de materiales se refiere, formulación de la mezcla, condiciones de utilización y puesta en obra. La diferencia esencial está ligada al almacenamiento intermedio que sufren los materiales fresados, y al lugar donde se elabora la mezcla. En la Figura 7 se observa una planta de reciclado en frío.

Como ventajas en comparación con los reciclados in situ, se pueden citar (Writgen,2010):

- Un mayor control de los materiales para la fabricación de la mezcla. El RAP puede tratarse mediante machaqueo y sustitución de áridos en caso de existir material no deseable.
- Calidad de la mezcla. Se pueden realizar ajustes en la planta para variar tiempos de mezclado, mejorando la calidad de la mezcla.

- La mezcla resultante se puede almacenar y utilizar cuando sea requerida, considerando siempre los tiempos de almacenaje, especialmente cuando la mezcla incluya cemento en su composición



Figura 7. Planta de reciclado en frío
Fuente: Roadtec, Astec Industries

2.4.4. Reciclado “in situ” en frío

2.4.4.1. Reciclado in situ en frío con cemento

Este es un procedimiento que se basa en el fresado en frío de un cierto grosor del firme envejecido y el mezclado de este material con un conglomerante hidráulico (cemento). El nuevo material se extiende y se compacta definiendo una sólida base para posteriores refuerzos.

Esta técnica presenta numerosas ventajas en la rehabilitación de carreteras degradadas que necesitan un aumento de su capacidad portante. El progreso de la técnica, ha hecho que esta solución haya sido tomada en cuenta en lugar de otros métodos clásicos como la reconstrucción o el tratamiento superficial. En muchas ocasiones, el reciclado con cemento es la opción de rehabilitación más económica.

En principio, no existen contraindicaciones para utilizar capas recicladas con cemento en carreteras de fuerte circulación, siempre y cuando, estas capas sean recubiertas con un revestimiento de mezcla bituminosa de espesor suficiente (alrededor de 4 cm).

Actualmente se disponen de máquinas recicladoras capaces de tratar de manera eficaz capas de firme de hasta 35 cm de espesor en una sola pasada. En la mayoría de los casos, son las prestaciones del compactador lo que limita el espesor a tratar.

Todos los tipos de cemento pueden ser utilizados para el reciclado, aunque los más usados son aquellos que incorporan aditivos activos, que aumentan el tiempo de manejabilidad.

Debido a la heterogeneidad de los materiales a reciclar, las variaciones en las propiedades mecánicas de los materiales tratados con cemento son particularmente grandes. En testigos extraídos de carreteras recicladas con esta técnica, se pueden encontrar variaciones en los valores de resistencia a la tracción de entre 0,4 y 2,5 MPa. Los módulos de elasticidad correspondientes pueden situarse entre 3500 y 37500 MPa (Lefort, 1997). Son muchos los factores que pueden influir en la variación de estos resultados, desde las grandes diferencias entre los materiales a tratar, hasta las propiedades de la mezcla (contenido de cemento, agua, densidad obtenida tras la compactación,...). A pesar de todo, las capas recicladas con esta técnica presentan un módulo de elasticidad elevado y como consecuencia de ello, una gran capacidad portante. Esto provoca una importante reducción de las deformaciones en las capas de rodadura, así como de las tensiones y deformaciones en la capa de base, en comparación con la estructura anterior al reciclado.

Los materiales reciclados con cemento pueden presentar fisuras transversales debidas al efecto combinado de la retracción, las solicitaciones del tráfico y el gradiente térmico. La prefisuración de las capas tratadas mediante cortes con un intervalo de unos tres metros, constituye el remedio más eficaz para minimizar el efecto de estas posibles fisuras en las capas bituminosas superiores. (Díaz, 2005)

2.4.4.2. Reciclado “in situ” con emulsión

El reciclado in situ en frío con emulsión bituminosa es una técnica cuyo objetivo fundamental es la transformación de un firme degradado en una estructura homogénea y adaptada al tráfico que va a soportar. Se realiza con equipos específicos multifunción que fresan el material, lo mezclan con agua y emulsión y lo extienden, realizándose todo este proceso a temperatura ambiente. Se aprovecha el 100% del material, por lo que presenta numerosas ventajas al disminuir transportes de material a la planta para su tratamiento y posteriormente transporte del material nuevo reciclado a su lugar de origen. Al ser una técnica en frío, supone un ahorro energético ya que no precisa de calentamiento de materiales.

Este tipo de reciclado es el que se va a estudiar en este trabajo de investigación, por lo que se desarrolla con más detalle en el siguiente epígrafe.

2.5 RECICLADO IN SITU EN FRÍO CON EMULSIÓN BITUMINOSA

2.5.1. INTRODUCCIÓN

La investigación llevada a cabo en este trabajo versa sobre el reciclado in situ en frío con emulsión bituminosa, por lo que se va a describir la técnica en este apartado. Se enumeran en primer lugar las ventajas que presenta y las limitaciones, a continuación se señalará la normativa técnica de aplicación. Posteriormente se describirán los materiales constituyentes y se procederá a explicar el dimensionamiento y el procedimiento constructivo de los firmes reciclados con emulsión bituminosa.

2.5.2. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA TÉCNICA

Las **ventajas** de la técnica de reciclado de firmes in situ en frío con emulsión bituminosa han sido señaladas por diferentes autores (Sebaaly et al., 2004). Se pueden destacar como ventajas de esta técnica:

AMBIENTALES

- Minimiza el impacto ambiental en la zona de influencia de la obra
Se reutilizan los materiales existentes del firme antiguo, sin necesidad de explotar nuevos yacimientos, ni de realizar nuevos vertidos
- Reducción el nivel de ruido.
Al reutilizar los materiales existentes en la carretera y suprimir la necesidad de aportar mezclas nuevas, se produce una reducción de transporte considerable, con la consiguiente reducción de ruido en la zona de influencia de la obra.
- Reducción de las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera
La reducción de los transportes en obra y la eliminación del calentamiento de materiales, se traduce en una importante disminución de la emisión de gases contaminantes. Alkins et al. (2008), lo refleja en su estudio, en el que comprueba que las emisiones producidas por los reciclados, tanto los reciclados con emulsión como los reciclados con betún espumado, son mucho menores que las producidas en las operaciones de fresado y reposición con mezcla bituminosa en caliente. En la Figura 8, se muestra las emisiones de CO₂ en cada una de las distintas técnicas estudiadas.

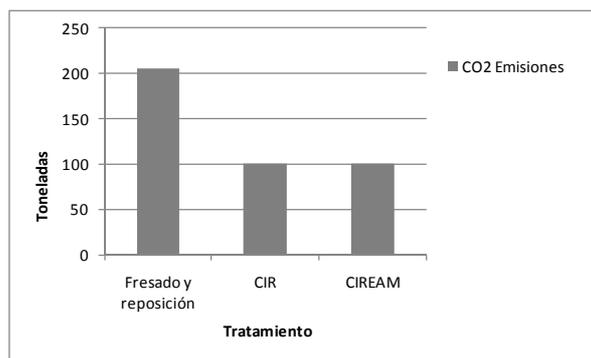


Figura 8. Emisiones de CO2 (Tn) en función del tratamiento. Fuente: Alkins et al., 2008

- Reducción de consumos energéticos

Al no tener que calentar la mezcla bituminosa, se disminuye el consumo de combustible fósil y la emisión de CO2 al medioambiente.

OPERATIVAS

- Disminución de las degradaciones colaterales de carreteras adyacentes

La disminución de transporte de material, protege las carreteras colindantes a la zona de actuación de posibles degradaciones frente a un tráfico pesado no previsto.

- Reducción de la perturbación al tráfico durante la construcción

Con una sola máquina, y en una sola pasada, se ejecuta el fresado del firme deteriorado, la mezcla con el ligante, y el extendido de la mezcla final. De esta forma se reducen las molestias y daños causados al tronco de la vía, por el peso y tránsito de la maquinaria de obra.

- Apertura al tráfico inmediata tras realizar los trabajos de reciclado.

- Aumento de la seguridad en obra

Al implicar una sola máquina en una pasada y al abrir el tráfico inmediatamente tras la realización de los trabajos, se aumenta la seguridad del tráfico y operarios.

TÉCNICAS

- Posibilidad de actuación sobre un único carril

Posibilidad de tratamiento diferenciado en carriles de tráfico pesado respecto a los adyacentes, con eliminación del refuerzo no necesario en éstos.

- Se mantienen las condiciones geométricas de las infraestructuras existentes

Al tratarse de un reciclado “in situ” de la carretera envejecida y degradada, se mantienen los gálibos horizontales y verticales, respetando la geometría inicial de la carretera. Este punto es importante en tramos de carretera situados bajo pasos superiores, pasos inferiores, cruces con otras vías principales a distinto nivel y túneles. (Pereira et al., 2006)

Además de estas ventajas, algunos estudios (Morian et al., 2005; Bermanian et al., 2006) han analizado los costes de distintas técnicas de conservación de carreteras y han puesto de manifiesto ventajas económicas que presentan los reciclados in situ en frío: se disminuye el volumen necesario de nuevos áridos a utilizar en la obra y el coste de su extracción, trituración y clasificación; no es necesario instalar una central de fabricación, ni realizar el transporte (gasóleo, aceites, desgaste de vehículos); se reduce el tiempo de construcción y el de afección al tráfico.

En cuanto a las **limitaciones** (Sebaaly et al., 2004) del reciclado in situ en frío con emulsión bituminosa, se pueden señalar las siguientes:

- No todos los materiales son susceptibles de ser reciclados de forma efectiva y económica. Cualquier operación de reciclado, al igual que cualquier otra técnica de conservación, requiere un estudio previo de las secciones y de los materiales.
- La variación del material a lo largo de la actuación, puede dar lugar a variaciones en el diseño y ejecución de la mezcla.
- El reciclado no permite solucionar algunos tipos de problemas habituales en los firmes, en particular los asociados a mala calidad de la explanada o de capas profundas. Tampoco es fácil solucionar problemas de deformaciones plásticas y, cuando es posible, puede ser necesario el empleo adicional de árido para corregir la granulometría de la mezcla existente.
- No es recomendable reciclar pavimentos que contengan geotextiles anti-fisuras, cuando éstos se encuentren dentro del espesor del material a reciclar, porque su disgregación es complicada, y aparecerán trozos de geotextil en la superficie que se desprenderán muy fácilmente y el aspecto de la mezcla será deficiente y poco funcional.
- Como cualquier otro material bituminoso, su puesta en obra depende de la climatología. No es recomendable ejecutar obras de reciclado con emulsión en los meses de invierno, con bajas temperaturas, ni en los periodos lluviosos.
- Hay que prestar especial atención a la compactación, el material fresado y tratado con una emulsión es de muy difícil compactación por su elevada angulosidad y áspera textura.

- En cuanto al diseño de las mezclas y cálculo de espesores de refuerzo, existe una gran carencia en los procedimientos de diseño de estos materiales y en el cálculo del espesor de refuerzo necesario para la rehabilitación de un firme (Pérez et al., 2003)

2.5.3. NORMATIVA TÉCNICA DE APLICACIÓN

En el año 2002, entra en vigor en España, la Orden Circular 08/2001, en la que quedan recogidas oficialmente las prescripciones de los de reciclados in situ en frío y de los reciclados en caliente en central. En esta Orden se definen los criterios de aplicación de las técnicas definidas en la misma, que en el caso del reciclado in situ en frío con emulsión, recogido en el Artículo 20, limita su utilización a carreteras con categoría de tráfico T1 e inferiores y se dispone la obligación del análisis de técnicas de reciclado como soluciones para proyectos de rehabilitación de firmes en aquellos casos en los que la superficie a rehabilitar sea superior a 70.000 m².

Según esta normativa, se definen en sus artículos correspondientes los siguientes tipos de reciclados in situ en frío:

- Artículo 20: Reciclado in situ con emulsión de capas bituminosas.

En este artículo se define este tipo de reciclado como: “Mezcla homogénea, convenientemente extendida y compactada, del material resultante del fresado de una o más capas de mezcla bituminosa de un firme existente en un espesor comprendido entre seis y doce centímetros, emulsión bituminosa, agua y, eventualmente, aditivos. Todo el proceso de ejecución de esta unidad de obra se realizará a temperatura ambiente y sobre la misma superficie a tratar.

A efectos de aplicación de este artículo el material definido en el apartado anterior sólo se considerará válido cuando el 90% o más del espesor de las capas a reciclar sean mezclas con ligantes hidrocarbonados”

- Artículo 21: Reciclado in situ con cemento en capas de firme.

“Se define como reciclado in situ con cemento de capas de firme la mezcla, convenientemente extendida y compactada, del material procedente del fresado de un firme existente (constituido por mezclas bituminosas y materiales granulares) con cemento, agua y, eventualmente, aditivos y árido de aportación, cuyo fin es reutilizar una o varias capas de un firme deteriorado, con un espesor total compactado comprendido entre veinte (20) y treinta centímetros (30 cm). Todo el proceso de ejecución de esta unidad de obra se realizará a temperatura ambiente y sobre la misma superficie a tratar.

El valor de treinta centímetros (30 cm) como límite máximo de espesor de la capa reciclada se podrá subir a treinta y cinco (35 cm) siempre y cuando en la obra se garantice una compacidad uniforme en todo el espesor de la capa.”

En la comunidad andaluza, se contemplan las operaciones de reciclado en frío en la Instrucción para el diseño de firmes del año 2007 y previamente se había redactado un Pliego para Reciclado de Mezclas Bituminosas en Frío “In Situ” con Emulsión Bituminosa. Se encuentra en la misma línea de prescripciones que la normativa estatal, aunque distingue los siguientes tipos de reciclado:

- Reciclado tipo I: Cuando el 75% o más del espesor de las capas a reciclar sean mezclas con ligantes hidrocarbonados
- Reciclado tipo II: Cuando menos del 75% del espesor de las capas a reciclar sean mezclas con ligantes hidrocarbonados.

En Castilla y León, la Junta actualizó en el año 2004, las Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos, que recogen comentarios acerca de esta técnica, y que al igual que la Junta de Andalucía, plantea más tipos de reciclado, a diferencia de la normativa estatal.

En otras comunidades autónomas también se encuentran distintas normativas aplicadas a la rehabilitación de carreteras como la Norma para el dimensionamiento de firmes en la red de carreteras del País Vasco, o la Norma de secciones de firmes de la Comunidad Valenciana.

En el ámbito europeo, en Francia se utiliza la guía técnica “Retraitement en place á froid des anciennes chaussées” editada en el año 2003 por el SETRA, en Alemania se tienen las Especificaciones técnicas para firmes reciclados (TL AG-StB 05) y en Suecia existe un manual de reciclado del año 2005 (ATB VÄG 2005).

En Estados Unidos donde la técnica de reciclado de carreteras está bastante desarrollada, se encuentra legislación específica en los distintos estados, así como un número importante de guías técnicas para el reciclado entre las que se pueden destacar:

- “Guidelines for Cold in-place Recycling”, ARRA, Annapolis, MD, 1991.
- “Pavement Recycling Guidelines for State Local Governments”, FHWA, U.S. Department of Transportation, Washington DC, 1987.
- “Asphalt Cold- Mix Recycling”, Asphalt Institute Manual Series No. 21, 1986.

2.5.4. MATERIALES

Los materiales que constituyen los reciclados in situ son el fresado ó RAP, la emulsión bituminosa, áridos de aportación en los casos que son requeridos, agua de aportación para favorecer la envuelta de los áridos y la compactación y en algunos casos aditivos.

2.5.4.1. MATERIAL FRESADO

El material disgregado, el RAP, es el componente principal de los reciclados de firme. Supone entre el 80-90% del total de la mezcla resultante en la mayoría de los casos. Estará constituido por un conjunto de partículas pétreas, recubiertas o no por ligante hidrocarbonado envejecido, y presentará cierta heterogeneidad.

De acuerdo con las características y el estado de las capas del firme, se determinará si existen zonas en las que no deba utilizarse el material existente. En algunos casos, como ocurre en España, se prohíbe expresamente reciclar el material procedente de pavimentos con deformaciones plásticas. En tal caso los materiales se retirarán y transportarán a un lugar autorizado y se sustituirán por un material adecuado, que podrá ser material fresado procedente de localizaciones distintas a la que se esté reciclando (PG-4. Artículo 20)

La calidad del RAP es un factor muy importante en el reciclado de mezclas bituminosas y depende de:

- La oxidación de la mezcla que provoca endurecimiento y pérdida de ductilidad.
- El desgaste y la erosión de los áridos
- Las deficiencias de la mezcla inicial en variables como el contenido de betún o la distribución granulométrica de los áridos

Se intentará asegurar que la contaminación del RAP sea inexistente o muy pequeña. Por ejemplo, la presencia de partículas de arcilla provocará defectos superficiales como ‘verrugas’ o protuberancias en el pavimento.

La granulometría del mismo dependerá de la velocidad de avance del equipo y de la velocidad de rotación del tambor de la recicladora. Es fundamental definir estos parámetros en el tramo de prueba para asegurar una correcta granulometría (Froumentin et al., 2008).

El huso en que debe encontrarse la curva granulométrica de las partículas del material a reciclar, según normativa española (Art. 20, PG-4) será uno de los indicados en la Tabla 2. El análisis granulométrico se realizará según la UNE- EN 933-1

Salvo justificación de lo contrario, el huso RE1 será de utilización para aplicaciones con espesores superiores a 10 cm y el huso RE2 para espesores comprendidos entre 6 y 10 cm.

TIPO DE RECICLADO	CEDAZOS Y TAMICES UNE-EN 933-2 (mm)									
	40	25	20	12,5	8	4	2	0,5	0,25	0,063
RE1	100	78-100	69-95	52-82	40-70	25-53	15-40	2-20	0-10	0-3
RE2	-	100	80-100	62-89	49-77	31-58	19-42	2-20	0-10	0-3

Tabla 2. Husos Granulométricos. Cernido Acumulado (% en masa)

Fuente: Artículo 20. PG-4

No obstante, en algunas ocasiones suele ser necesaria la adición de nuevos áridos vírgenes a la mezcla, debido a una serie de factores como son:

- Mejora de la granulometría. El pavimento existente puede no tener la granulometría deseada, o aún siendo así, ésta puede cambiar durante su proceso de demolición. De esta manera, añadir nuevos áridos permite mejorar la gradación de la mezcla reciclada modificándola hasta un rango aceptable.
- Calidad de los áridos. Aunque la granulometría fuera adecuada, puede suceder que la calidad de los áridos en la mezcla original no sea la óptima. Una excesiva presencia en el RAP de granulados rodados debido a su economía puede ser corregida mediante la adición de nuevos áridos.
- Exceso de filler en el RAP. Originariamente, el pavimento del que se obtiene el RAP contendrá una cantidad de filler igual o superior a la permitida en normativas actuales. Además, durante el proceso de demolición, este porcentaje normalmente se incrementa del 1 al 3% adicional. De esta manera, para controlar la calidad del filler en la mezcla final se debería limitar la cantidad de éste en los nuevos granulados.

2.5.4.2. EMULSIÓN BITUMINOSA

La afinidad entre el ligante y los áridos es un fenómeno más complejo en el caso de las emulsiones que en el de las mezclas bituminosas en caliente. Durante la etapa de mezcla, el árido es el factor principal de inestabilidad de la emulsión; éste determina en gran parte el proceso de envuelta y de toma de cohesión. En las mezclas en frío, y en particular en los casos del reciclado, además del parámetro de superficie específica, es necesario tener en cuenta las posibilidades de absorción de agua y la naturaleza química de la superficie mineral.

Al menos tres fenómenos pueden iniciar el proceso de ruptura de la emulsión en contacto con el árido (Potti et al., 1999 a):

- Una capacidad elevada de absorción de agua por parte del árido. Un árido que posee una elevada capacidad de absorción de agua produce una precipitación de las partículas de betún por "aspiración"; esto conduce a una envuelta con enlaces débiles. Es el caso típico de las rocas volcánicas que poseen una porosidad elevada. Este fenómeno de aspiración se produce con mayor facilidad cuanto más secos y a mayor temperatura estén los áridos.
- Un cambio repentino en el valor del pH. Un cambio repentino en el pH de los áridos es típico de los áridos calcáreos con un pH neutro inicial. Este fenómeno, según Lesueur (Lesueur,2000) puede ser localizado mediante el análisis del agua liberada durante la ruptura de la emulsión.
- Presencia de terminaciones catiónicas liberadas por la superficie mineral.

Para la caracterización de la emulsión de betún, además de los ensayos habituales (viscosidad, contenido de betún residual,...), hay que determinar la distribución de los diámetros de las partículas de betún (con la ayuda de un dispositivo laser interpretando los resultados mediante el modelo de Mie o Fraunhofer), así como el contenido residual de emulsionante.

El tipo de emulsión estará condicionada por el envejecimiento del ligante existente en el RAP. El envejecimiento de un ligante es un fenómeno físico-químico que consiste básicamente en una pérdida de los componentes más volátiles y en un proceso de oxidación; por tanto, depende de la composición química y de las condiciones medioambientales. Generalmente, los betunes debido a sus propiedades y a su naturaleza hidrocarbonada, presentan una gran resistencia al envejecimiento, pero debido a una serie de factores y agentes externos, se producen cambios en su composición que repercuten negativamente en sus propiedades. Son muchos los estudios analizan los efectos y causas del envejecimiento de ligantes, como Branthaver (1993), Davison (1994) , Johansson (1998) y Petersen (2000) . Así pues, a la hora de proyectar un reciclado hay que estudiar cuidadosamente el grado de envejecimiento del ligante original para obtener un ligante final que sea adecuado a la mezcla bituminosa de la que va a formar parte, y capaz de resistir las sollicitaciones a las que se va a ver sometido.

Para que la mezcla reciclada presente un buen comportamiento hay que tener en cuenta dos consideraciones importantes relativas al ligante utilizado: por un lado el proceso de mezclado de los ligantes y por otro, la calidad del ligante reciclado (Karlsson et al., 2006).

Para conseguir modificar las propiedades del betún, existen agentes denominados rejuvenecedores, que añadidos a la emulsión mejoran la calidad del ligante final. Roberts et al. (Roberts et al., 1996) hace una distinción entre agentes suavizantes y agentes rejuvenecedores. Los primeros bajan la viscosidad del ligante envejecido mientras que los segundos pueden mejorar las propiedades físicas y químicas del mismo.

Como regla general para obtener un material reciclado de buena calidad se utilizan emulsiones de rotura lenta, y estarán caracterizadas con los siguientes ensayos: carga de las partículas, contenido de agua, residuo por destilación, penetración del residuo, viscosidad Saybolt Furol a 25°C, ductilidad del residuo, tamizado, estabilidad de las emulsiones aniónicas con cemento

La normativa española indica que la emulsión a emplear debe ser alguna de las siguientes: ECL-2, ECL-2d o ECL-2-m. En caso de utilizar emulsiones con adiciones éstas no deberán contener fluidificantes, y así mismo se establecerá el tipo de adición y las especificaciones a cumplir, tanto la emulsión bituminosa y su ligante residual, como la unidad de obra terminada. (Art. 20, PG-4)

2.5.4.3. ARIDOS DE APORTACION

En determinadas actuaciones, aunque no con carácter general, es preciso realizar correcciones granulométricas mediante la aportación de nuevos áridos. Éstos deberán ser de buena calidad y cumplir las prescripciones correspondientes relativas al empleo de áridos en mezclas bituminosas

2.5.4.4. ADITIVOS

La adición de aditivos, como la cal o el cemento, a la mezcla pueden suponer una mejora en la calidad final de la misma o permitir una reducción en el tiempo de espera de maduración del material.

La normativa española (PG-4) fija los aditivos que pueden utilizarse para controlar la rotura de la emulsión o mejorar las características de la mezcla, las cuales deben ser especificadas en la fórmula de trabajo.

Se establece, a su vez, la proporción adecuada de aditivos que se vayan a emplear y el método empleado para su incorporación, así como las especificaciones que deben cumplir, tanto dichos aditivos como la mezcla resultante.

Solamente se autoriza el uso de aditivos cuyas características y especialmente su comportamiento y efecto sobre la mezcla al emplearlos en las proporciones previstas vengan garantizados por el fabricante. Es obligatorio realizar ensayos previos para comprobar que cumplen su función con los materiales y dosificaciones previstas en la fórmula de trabajo.

2.5.5. DIMENSIONAMIENTO

El dimensionamiento firmes es complejo, y en especial en el caso de secciones recicladas, ya que en ocasiones no se conoce con exactitud la composición del firme deteriorado en toda la extensión del tramo, por lo que es muy común encontrar zonas poco homogéneas.

El fin último del proceso de dimensionamiento, una vez elegida la naturaleza de las capas que van a integrar la sección seleccionada, es determinar el espesor de cada una de ellas. La tendencia más habitual suele ser acudir a catálogos de secciones que, en función del tráfico esperado, la aplicación de los coeficientes de equivalencia y el nivel de deflexiones existentes, proporcionan los espesores buscados. Este camino permite simplificar el proceso para los no expertos, conjugando las bondades del cálculo analítico con la experiencia y racionalidad de lo que es constructivo y está sancionado por la experiencia.

Otra posibilidad es utilizar un procedimiento analítico de cálculo. Generalmente se utilizan los modelos de respuesta basados en el modelo elástico multicapa, complementado con un análisis del comportamiento a fatiga de la estructura. La dificultad principal radica en la determinación de los módulos de cada capa y de las correspondientes leyes de fatiga en estos materiales poco cohesivos (Brosseaud et al., 2006).

Para las capas recicladas con emulsión, es frecuente admitir un módulo (que está del lado de la seguridad) de 2.500 MPa. Sin embargo, este módulo penaliza mucho el comportamiento de la capa reciclada. En algunos casos, tanto es así, que por ser menor el módulo atribuido al reciclado que el de la mezcla bituminosa que actualiza, cuanto mayor es el espesor reciclado menos ejes soporta la sección en cuestión. De la experiencia se desprende que los módulos alcanzados con este tipo de mezclas, después de completado su periodo de curado, pueden llegar sin problemas a los 4.000 MPa (Eckmann et al., 2006; Brosseaud et al., 2006)

La norma española 6.3 IC “Rehabilitación de firmes” (Ministerio de Fomento, 2003) indica que cuando se recurre a secciones tipo par dimensionar los firmes reciclados hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Asignar un coeficiente de equivalencia al material reciclado respecto a una mezcla en caliente.
- Para tráfico T1 el material reciclado se debe recrecer con al menos ocho centímetros de mezclas bituminosas.
- Para tráfico de categoría inferior a T1 la Instrucción 6.3 IC requiere la aplicación de una mezcla bituminosa densa o semidensa. Para tráfico T4 la experiencia demuestra que la aplicación de lechadas bituminosas o de riegos con gravilla sobre el reciclado es una solución con suficiente durabilidad.

En muchos países, la concepción de los parámetros de cálculo se sustenta en una base empírica mediante el empleo de ábacos. Este es el caso de la guía denominada “Guide for design of pavement structures” publicada en 1986 por la AASTHO que utiliza un método de

dimensionamiento a partir de números estructurales. El Instituto del Asfalto también recurre a dimensionamiento de carreteras recicladas mediante ábacos en su manual “Flexible Pavement Structural desing” (Asphalt Institute, 1981).

Para el dimensionamiento correcto del firme (tanto por el método de secciones tipo como por un método analítico) es necesario disponer de datos de deflexiones del firme. Otra información muy valiosa es conocer la sección real del firme, ya que a partir de unos datos dados de deflexiones la nueva sección variará dependiendo del tipo de base y explanada existente. (Peña et al., 2007)

2.5.6. PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN

La práctica constructiva que se describe a continuación tiene lugar una vez que se ha determinado que la mejor opción de rehabilitación para la vía es un reciclado y se ha redactado el proyecto de construcción de la actuación.

2.5.6.1. ETAPAS DEL PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN

El procedimiento a seguir en las actuaciones de reciclados in situ en frío presenta variaciones dependiendo del país en el que se realizan, pero en líneas generales se puede afirmar que los pasos en este tipo de actuaciones son los descritos en los siguientes subepígrafes.

Las variaciones más significativas se encuentran en las directrices para llegar a la fórmula de proyecto, como veremos más adelante, especialmente en USA, donde incluso, dependiendo del estado en el que se efectúa la actuación, los procedimientos de diseño seguidos pueden ser diferentes.

a) Inspección visual

Se necesita llevar a cabo una inspección visual del pavimento existente para definir tramos homogéneos, tipos y nivel de deterioros, zonas localizadas con deterioros importantes que puedan necesitar tratamiento específico, problemas relacionados con la presencia de bordillos, arquetas, obras de fábrica, estructuras y accesos y zonas donde se puedan estacionar los equipos de construcción. Toda esta información se debe reflejar en unos esquemas de fácil consulta.

b) Toma de muestras

La fase de toma de muestras es crítica no sólo desde el punto de vista del reconocimiento de la sección del firme a reciclar sino como paso previo para establecer la estrategia de tramificaciones más adecuada para la ejecución de las obras.

La representación en un mismo diagrama del resultado de la inspección visual, de las auscultaciones y, si se dispone de él, del historial, proporciona una imagen más clara del

estado del firme y permite asociarla a las zonas homogéneas que presentan un nivel similar de deterioro.

El muestreo del firme se realiza en puntos aleatorios determinados dentro de las zonas homogéneas.

Los materiales se deberían tomar con los equipos de disgregación con los que se va a realizar el reciclado. Sin embargo, es muy frecuente que las muestras extraídas del firme no estén disgregadas, esta circunstancia debe ser tenida en cuenta y, en la medida de lo posible, habría que estimar o simular en laboratorio los efectos de la futura disgregación, especialmente en la fase en la que se establezcan las fórmulas de proyecto.

Las muestras obtenidas se ensayan en laboratorio a fin de definir las características de los materiales a reciclar en cuanto a granulometría, calidad del árido grueso, limpieza, compactibilidad, homogeneidad.

Hay que comprobar además las características del betún de las capas que se vayan a reciclar y especialmente el contenido de betún residual, consistencia (penetración), punto de reblandecimiento y en ocasiones su contenido de asfaltenos y viscosidad.

c) Fórmula de trabajo

La definición de la fórmula de trabajo es la consecuencia de los ensayos realizados en el laboratorio, y las exigencias propias del trabajo a realizar. Para su determinación es fundamental que los materiales sean lo más representativos posible, no sólo respecto de su procedencia, sino también respecto al proceso de fresado al que van a ser sometidos.

El diseño de formulas de trabajo es todavía demasiado empírico debido principalmente a la falta de un método de estudio en laboratorio que permita recoger datos representativos del estado de los materiales después de la fragmentación y de simular la evolución de sus características en obra. Este empirismo se traduce en la utilización de ensayos de laboratorio convencionales, que no tienen en cuenta las características intrínsecas del material.

Hay una gran variación internacional sobre procedimientos para llegar a la fórmula de proyecto. Como similitudes a destacar entre los métodos se puede decir que en todos ellos la fórmula de trabajo refleja: la granulometría del material fresado, el porcentaje de envuelta, correcciones necesarias para el árido en caso de que así se requiera, tipo y cantidad de aditivos, tipo de emulsión bituminosa y porcentaje respecto al árido seco. Sin embargo, en contrapartida, se encuentran diferencias considerables entre los distintos métodos, así por ejemplo, las condiciones de curado de las probetas para la elección del contenido óptimo de ligante difiere tanto en número de días de curado como en la temperatura de curado (Mollenhauer, K., 2011).

Entre los métodos internacionales de definición de fórmulas de trabajo en las actuaciones de reciclado in situ con emulsión bituminosa, destacan los siguientes, resumidas por Fenández

del Campo en su obra “Tratado de estabilización y reciclado de capas de firmes con emulsión asfáltica” (Fernández del Campo, 1998):

- **Método del Instituto de Asfalto**

En este método (Asphalt Institute, 1999), después de caracterizar los materiales y seleccionar la emulsión asfáltica, se determina un contenido teórico de ligante que permita iniciar las pruebas de caracterización de las mezclas mediante la determinación del Equivalente Centrífigo de Keroseno (CKE), incrementándolo en el 40%.

Se utiliza el ensayo de envuelta para determinar el contenido óptimo de fluidos con el que se logre el correcto mezclado y como criterio para evaluar la compatibilidad de la emulsión con los áridos. Este contenido óptimo se utiliza para preparar las sucesivas muestras y considerando fluidos al total correspondiente a la adición de emulsión asfáltica, agua añadida y humedad natural del árido.

La determinación del contenido óptimo de fluidos para la compactación, se realiza preparando una prueba que permita obtener una relación de densidad seca y % de fluidos, realizado con tres muestras de diferentes contenidos de agua.

El método de diseño establece diferencias, en relación con el tiempo de curado para las pruebas de determinación del contenido óptimo de betún o de emulsión, de acuerdo a si la mezcla se utiliza como base, capa de rodadura temporal o definitiva.

Se determinan en todos los casos las densidades y se calculan los volúmenes de huecos en la mezcla, volumen de betún y de áridos en todas las probetas. Para la caracterización de las mezclas se utiliza el Estabilómetro de Hveem y el ensayo del Cohesiómetro a 73°F (23°C), y se calcula la resistencia total de cada probeta ensayada empleando la Estabilidad R alcanzada y la Cohesión C, mediante la expresión: $R_t = R + 0,05C$.

En función de la capa en la que vaya a ser utilizada la mezcla, se establecen unos requisitos mínimos y se decide el contenido óptimo de emulsión.

- **Método Marshall Modificado para Emulsiones**

Consiste en emplear las mismas probetas, martillo y equipo que el que se utiliza para el diseño de mezclas asfálticas en caliente con el método Marshall y está concebido para el proyecto de mezclas con tamaños máximos menores de 25,4 mm (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 1996). Las probetas se elaboran con varios contenidos de ligante, a las cuales se les determina su densidad, porcentaje de huecos, porcentaje de huecos rellenos de betún, porcentaje de huecos en los áridos y se les mide la estabilidad y deformación en sentido diametral, cuando las muestras son sometidas a unas condiciones desfavorables de humedad y temperatura.

El cálculo teórico del contenido óptimo de emulsión como contenido inicial en las pruebas, se basa en la utilización de las fórmulas empíricas del Método del Instituto del Asfalto (USA) o el Método Duriez (Francia).

Se hacen pruebas de mezclado empleando el óptimo de emulsión teórico previamente calculado, con diferentes cantidades de agua agregada al material pétreo, lo que permite obtener el contenido óptimo de agua de preenvuelta y mezclado, cuya selección corresponde al porcentaje con el cual se logre la mejor envuelta a y trabajabilidad de la mezcla.

En la fabricación de las probetas se utilizan cantidades de betún que varían a partir del contenido teórico calculado en +0,5%; +1,0%; -0,5%; -1,0%; tres probetas por cada porcentaje de emulsión y utilizando el contenido de fluidos óptimo para el mezclado. Las mezclas elaboradas se dejan en reposo durante 24 horas para que el betún en forma de emulsión desarrolle la cohesión y adhesividad como ligante, y se complementa dejando otras 24 horas la mezcla en estufa a la temperatura controlada de 60°C hasta peso constante.

A continuación se calienta la mezcla a 100°C, se fabrican las probetas y se ensaya definiendo el contenido óptimo en función de los resultados obtenidos.

- Método de la Universidad de Illinois.

El contenido de emulsión inicial para el comienzo de las pruebas se determina mediante la siguiente fórmula empírica basada en la granulometría del árido

$$E = 0.05 A + 0.1 B + 0.5 C$$

Donde:

E = porcentaje teórico en peso de la emulsión asfáltica.

A = 100 – pasa tamiz N° 8 (2.36 mm)

B = (Material pasa por el tamiz N° 8(2.36 mm)) – (Material pasa por el tamiz N° 200(75µm)).

C = Material pasa por el tamiz N° 200(75µm)

El método recomienda en el ensayo de envuelta un porcentaje inicial de agua de 0% para el caso de emulsiones aniónicas y de 3% para catiónicas, y las envueltas posteriores con un incremento de 1%. Se evalúa por estimación visual, la apariencia de la superficie seca mezclada, a través del porcentaje de cobertura y se considera aceptable un porcentaje de cobertura del 50%, rechazándose cuando ninguna de las muestras alcanza una cobertura del 50%.

Para obtener la humedad de compactación, son suficientes para el ensayo cinco contenidos de agua, y se preparan tres muestras en cada uno de dichos contenidos. En la preparación de las muestras se consideran dos situaciones: si el contenido de agua que se va a añadir es

menor que el mínimo obtenido en la envuelta, se requiere entonces que se adicione suficiente cantidad de agua para el mezclado y luego secarla mediante estufa a 200± 5°F, hasta alcanzar un peso que difiera 20 gramos del requerido, y así la mezcla estará lista para la compactación. El segundo caso se presenta cuando el contenido de agua es mayor o igual al mínimo obtenido en el ensayo de envuelta, entonces el árido, el agua y la emulsión se mezclan pero sin calentarla en estufa, es decir, la mezcla está lista para la compactación inmediatamente después del mezclado.

Las mezclas se compactan en los moldes Marshall, usando 75 golpes por cara y son curadas durante 24 horas a 72±3°F, sin desmoldara. Se someten posteriormente al ensayo de estabilidad Marshall. El contenido de agua que tenga el mayor promedio de estabilidad es considerado como el óptimo de compactación. Si este contenido es mayor que el contenido óptimo establecido en el ensayo de envuelta, no existirían diferencias entre el contenido de agua para el mezclado y la compactación. Si ocurre lo contrario existirían diferencias y sería necesario secar todas las mezclas sucesivas que se preparen.

Se preparan seis probetas para cada uno de los cinco contenidos de betún residual: dos contenidos debajo del contenido teórico, dos por encima y uno con el contenido teórico. Tres muestras serán compactadas en el molde Marshall estándar y las otras tres en moldes especialmente tratados (por accesorio perforado en el plato metálico).

El contenido de emulsión seleccionado en la mezcla debe satisfacer un valor mínimo de estabilidad de 500 lb (2,224N) para probetas ensayadas a 72°F (22,2°C). Se exige que el porcentaje de huecos se encuentre entre 2 y 8, una pérdida de estabilidad (en %), después de 4 días de inmersión a 72°F (22,2°C) de 50%, y un porcentaje de agua absorbida de 4%. La envuelta con los áridos se considera satisfactoria con un mínimo del 50%.

- Método de la Compañía Chevrom

Se realizan ensayos de envuelta con diferentes cantidades de agua y de emulsión, y sólo con los áridos que pasen por el tamiz de ¾", y sustituyendo el material que se retiene por una cantidad equivalente de material pasado, con el propósito de lograr una cubrición satisfactoria. En las mezclas para capas de base se estipula que la envuelta sea del 50%, mientras que en las mezclas para capas de rodadura se debe alcanzar el 75% de cubrición de los áridos.

Los fluidos óptimos para la compactación se determinan mediante una prueba de compactación en la cual se prepara una probeta compactada inmediatamente después de mezclada, y otras dos después de airearla. Después de compactadas mediante el compactador de Hveem (10 a 50 golpes de 1,725 kN/m²), seguido de una carga estática de doble efecto de 10,500 kg, se secan en estufa hasta peso constante, y se obtiene la curva de densidad/% de fluidos, donde el máximo de densidad indica el porcentaje de fluidos óptimo para la compactación.

Se preparan 4 probetas por cada contenido diferente de emulsión, correspondientes a 1,1; 1,4 y 1,7 veces el índice de keroseno (CKE), y se dejan curar en dos grupos en diferentes condiciones. El primer grupo se deja en el molde con el eje en posición horizontal, y a temperatura ambiente durante 72 horas. Después de desmoldarlas se desecan prácticamente al vacío durante 4 días, se saturan posteriormente durante 1 hora a temperatura ambiente y se le aplica una presión de 100 mm/Hg durante otra hora, hasta que se mide el módulo resiliente a temperatura ambiente. El segundo grupo de probetas sólo se somete a un proceso de curado a temperatura ambiente durante 72 horas. (Epps et al., 1990)

- California Test 378

Esta norma utilizada por el Departamento de Transportes de California (California Department of Transportation, 2000) describe la metodología a seguir para determinar el porcentaje óptimo de emulsión en los reciclados en frío de mezclas bituminosas.

Las muestras para el diseño en laboratorio se pueden obtener de dos formas diferentes: las que proceden de testigos o trozos de pavimentos y las mezclas que proceden de material fresado en el campo.

En el primer caso el material fresado se tritura en laboratorio y se conforma una granulometría que corresponde aproximadamente con el 100% pasado por el tamiz de 25 mm, el 70% pasado por el tamiz N° 4, y para los tamices intermedios (3/4" y 3/8") se fija el porcentaje que debe pasar mediante el trazado de una línea recta entre los puntos ploteados para los tamices de 1 pulgada y N° 4.

En el segundo caso, se deben preparar muestras representativas del material procesado por el contratista (fresada o triturada), y se determina la granulometría por tamizado a través de los siguientes tamaños: 1, 1/2", 1", 3/4", 3/8", N°4.

En cualquier caso debe determinarse la viscosidad del betún asfáltico componente de la mezcla. El contenido inicial de ligante para el comienzo de las pruebas (ABR) se calcula mediante una fórmula empírica que tiene en cuenta los porcentajes pasados y/o retenidos por los tamices N° 8 y N° 200, después de la extracción del betún. Luego a esta cantidad de agente reciclante a adicionar (ABR), se le resta el contenido asfáltico obtenido del pavimento viejo y dividiendo el resultado por 0,6, se obtiene el porcentaje de agente de reciclado emulsionado a adicionar.

En el método se utiliza un Nomograma de Viscosidad para determinar la consistencia del agente de reciclado, ploteando la viscosidad del betún envejecido y la viscosidad del residuo para los diferentes agentes de reciclado disponibles, creando así una familia de curvas.

Las muestras de ensayo se preparan para la evaluación en el Estabilómetro, con la adición del 2,0% de agua de preenvuelta, y variando los porcentajes de emulsión, respecto al valor inicial en incrementos de 0.8%. En la práctica se incrementa el contenido en una muestra y

se decrece en dos, y las mezclas son curadas en estufa a una temperatura de 140°F por 16 horas.

El ensayo del Estabilómetro se realiza a una temperatura de 140°F, para lo cual se preparan probetas con alturas entre 2,40 y 2,60 pulgadas, se les determina previamente la densidad específica y se calcula el contenido de huecos. El Contenido Óptimo de Betún (OBC) será el mayor contenido de emulsión que provoca una probeta con el valor deseado de Estabilómetro, sin evidencia de superficie exudada y un mínimo de 4% de huecos. El valor exigido para pavimentos es un mínimo de 30 como valor de resistencia en el Estabilómetro de Hveem, mientras que para arcenes, se exige un mínimo de 25.

Por último es necesaria una corrección del grado de agente de reciclado, para lo cual se vuelve a plotear el contenido final de ligante en el Nomograma de viscosidad. Si este resultado, necesario para usar en el agente de reciclado, difiere del ensayado, se debe repetir usando la cantidad recomendada con el nuevo agente de reciclado designado.

- Método basado en el ensayo de inmersión-compresión

En España, se utiliza como parámetro de diseño el ensayo de Inmersión-Compresión recogido en la norma NLT-162 (CEDEX, 2000). Este ensayo permite determinar la pérdida de cohesión por acción del agua en mezclas bituminosas compactadas. Se fabrican 10 probetas de 101,6 mm de diámetro y 101,6 mm de altura, mediante aplicación de una carga estática de 170kN y se someten a un proceso de curado forzoso durante tres días en estufa a 50°C. A continuación se acondiciona un primer grupo de 5 probetas en aire a 25°C durante 24 horas y un segundo grupo en baño de agua a 60°C durante 24 horas. Transcurrido el periodo de acondicionamiento se introducen en un baño de agua a 25°C durante dos horas para determinar a continuación su resistencia a compresión simple. Para ello se someten a una carga axial sin soporte lateral a una velocidad de deformación de 5,08 mm/min. Se determina un índice numérico (Índice de Resistencia Conservada) como la relación entre la resistencia obtenida en el grupo de probetas sumergidas entre la resistencia a compresión obtenida en el grupo de probetas no sumergidas.

Se realiza este ensayo con distintos porcentajes de emulsión añadidos al material reciclado (RAP) y se decide el óptimo que cumpla las resistencias mínimas exigidas en función del tráfico que vaya a soportar. En España, estas exigencias, definidas en función de la categoría de tráfico pesado de que se trate están recogidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras, PG-4 y se muestran en la siguiente tabla:

	Resistencia Seca (R) MPa	Resistencia Húmeda (r) MPa	Resistencia Conservada (r/R) %
T1, T2*	3	2,5	75
T3, T4 y Arcenes*	2,5	2	70

Tabla 3. Resistencias mínimas exigidas en el ensayo de Inmersión-Compresión. Artículo 20 PG-4

*CATEGORÍAS DE TRÁFICO

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	T00	T0	T1	T2	T31	T32	T41	T42
IMDp (vehículos pesados / día)	≥ 4000	<4000 ≥2000	<2000 ≥800	<800 ≥200	<200 ≥100	<100 ≥50	<50 ≥25	<25

Tabla 4. Categorías de tráfico pesado. Norma 6.1 I-C "Secciones de Firme"

d) Tramo de prueba

Una vez definida la fórmula de trabajo en laboratorio se procede a la ejecución de obra, realizando en primer lugar un tramo de prueba por cada tramo homogéneo definido. Se utilizará el mismo equipo con el que se vaya a ejecutar la obra y se ajustarán parámetros como:

- La relación entre la velocidad de avance del equipo fresador y la granulometría y calidad de envuelta alcanzadas.
- La velocidad de rotación del rotor fresador, el número de picas y la frecuencia de su reposición.
- La exactitud de los sistemas de dosificación del agua, emulsión y aditivos, en su caso.
- La humedad óptima de compactación
- La composición y forma de actuación del equipo compactador, estableciendo las relaciones entre orden y número de pasadas de los compactadores y la densidad alcanzada.

En base a los resultados obtenidos se verifica la fórmula de trabajo ó se proponen modificaciones en la misma, si fuesen negativos, y se aprueban los equipos para la realización del reciclado y la forma específica de actuación.

e) Ejecución del reciclado

Aprobado el tramo de prueba se procede a la ejecución del reciclado. La superficie a tratar estará limpia y exenta de agua y los saneos necesarios en blandones y baches detectados en la inspección visual habrán sido corregidos.

El fresado se realiza con el equipo y método aprobados en la fórmula de trabajo. Hay que prestar atención, en caso de paradas del equipo al suministro de agua y emulsión para evitar sobredosificaciones o encharcamientos. Las bombas y difusores de estos suministros tienen que ser purgados y revisados antes de iniciar el proceso para garantizar las dotaciones de manera continua y uniforme.

En aquellos casos en los que la anchura de la superficie a reciclar es mayor que el equipo de reciclado se trabaja por franjas paralelas, adaptando los caudales de aportación de emulsión y agua en los solapes.

Si es necesaria la aportación de áridos se extienden previamente sobre el pavimento a fresar. Los aditivos se agregan por vía líquida mediante dosificación directa en la mezcla por contadores volumétricos e inyección en la cámara de fresado.

La compactación no se puede retrasar más de treinta minutos después de la extensión de la mezcla. Se realiza longitudinalmente, de manera continua y sistemática. Los rodillos tienen que llevar su rueda motriz en el lado más cercano a la recicladora y los cambios de dirección se tienen que hacer siempre sobre mezcla ya compactada.

En algunos casos para evitar desprendimientos superficiales o si se prevén lluvias durante el proceso de maduración de la mezcla, está justificado el empleo de un riego de protección, en el que se usa una emulsión de rotura rápida y con dotaciones de 200 a 300 gramos por metro cuadrado.

La extensión de la siguiente capa sobre el reciclado se realiza cuando la humedad presente en la mezcla es menor del 1% y es posible extraer un testigo del reciclado en todo su espesor sin que se desmorone.

2.5.6.2. MAQUINARIA Y EQUIPOS DE EJECUCIÓN

En este apartado se hace sólo mención al equipamiento específico para las labores de reciclado y compactación. El equipo necesario para la ejecución de las obras puede estar compuesto por equipos independientes que realicen por separado las operaciones de fresado, dosificación y distribución de la emulsión y del agua, o bien equipos que realicen dos o más de estas operaciones, excepto la compactación, de forma simultánea. Para cada una de las fases del proceso hay una o varias máquinas de uso múltiple a las que cabe recurrir aunque lo más usual es la utilización de equipos específicos, cada vez mejor adaptados, que realizan las operaciones ya mencionadas de una sola pasada.

El equipo de fresado, con anchura mínima de medio carril y dotada de rotor de fresado de eje horizontal, deberá fresar el firme existente en la profundidad y anchura necesarias para obtener la mezcla deseada, produciendo un material homogéneo con la granulometría requerida en una sola pasada y a una velocidad constante adecuada. Las fresadoras estarán dotadas de un dispositivo de control automático que asegure el espesor deseado. También

estarán provistas de un dispositivo que evite el levantamiento en bloques del material. En Europa está generalizado el fresado hacia arriba, mientras que en USA son corrientes los equipos de fresado hacia abajo que permiten obtener granulometrías más finas y uniformes, sobre todo cuando el firme está muy fisurado. (Asphalt Recycling and Reclaiming Association, 2001)

El equipo de dosificación de la emulsión bituminosa y del agua y los aditivos, se compone de depósitos, bombas de caudal variable y difusores, con control automático programable de dosificación, que permiten realizar las dosificaciones de la fórmula de trabajo escogida a tal efecto, según la profundidad y anchura del material fresado que se vaya a reciclar, y según la velocidad de avance de la máquina.

El mezclador garantiza una mezcla homogénea y uniforme en toda la anchura y profundidad del reciclado. La mezcla se realiza en las propias máquinas fresadoras aprovechando la energía del rotor de fresado, disponiéndose el sistema de dosificación incorporado en el elemento de fresado.

El suministro de la emulsión y del agua a la unidad de mezcla se realiza desde cubas o depósitos móviles, de modo que no se produzcan paradas de los elementos de mezcla y extensión del material reciclado.

Para la extensión se dispone un distribuidor que evita la segregación del material mezclado y realiza una extensión y precompactación homogéneas y con el perfil deseado, mediante una muestra de extensión con dispositivos de nivelación automáticos. Para los tráficos más fuertes y cuando se requiera un nivel de acabado mejor se evitará el extendido con motoniveladora (Tomás, 1998)

2.5.6.2.1. EQUIPOS DE RECICLADO

El reciclado in situ se realiza mediante equipos específicos que fresan el firme en una determinada profundidad, lo mezclan con el ligante y lo extienden. Existe una gran variación de maquinaria para la ejecución de los reciclados. Desde equipos muy sencillos hasta equipos completos que incluyen fresadora, machacadora, mezclador y sistema de extensión con regla de alta compactación. Pueden estar constituidos por varias máquinas trabajando a cierta distancia unas de otras o bien por varias máquinas trabajando conectadas entre sí o por una única máquina compacta. Se describen a continuación algunas posibles configuraciones que se utilizan con más frecuencia.

Fresadora-Machacadora-Mezcladora + Extendedora

Es una configuración empleada en USA y Canadá, pero no es normal en Europa y en España no se ha utilizado hasta el momento. Proporciona resultados de muy buena calidad y altos rendimientos pero tiene un elevado coste de adquisición.

Se trata de una fresadora de gran potencia, habitualmente de 3,50m. de ancho, unida a una plataforma sobre la que se ha dispuesto un equipo de machaqueo y cribado que permite

procesar el material aportado por la fresadora limitando el tamaño máximo (generalmente a 20-25 mm, según espesor de capa). Con el material ya procesado se alimenta un mezclador que va montado sobre la misma plataforma anterior o bien sobre otra solidaria de la anterior. La alimentación de emulsión y agua se realiza mediante cisternas conectadas por mangueras y la dosificación a través de bombas y contadores, de la misma forma que en la mayor parte de los equipos. En el caso de que se requiera un aporte de áridos para corregir granulometría, éstos se extienden sobre el pavimento, por delante del equipo

Fresadora + Mezcladora-Extendedora

En este caso se emplean dos equipos trabajando en serie. El primero es una (o varias) fresadora convencional que levanta el pavimento. El material fresado debe llegar a la mezcladora-extendedora para lo cual existen tres posibilidades:

- puede depositarse formando un cordón, en cuyo caso la carga de la mezcladora-extendedora se hace mediante un equipo ad hoc: cargadora de cadenas o de cangilones.
- puede cargarse sobre camión y éste se encarga de depositar el material en la tolva de la mezcladora-extendedora. En este caso puede tratarse la superficie (limpieza y adherencia o imprimación) previamente a la extensión.
- puede depositarse sobre la tolva de la fresadora-extendedora mediante una cinta transportadora convencional.

Fresadora-Mezcladora + Extendedora

Esta configuración difiere de las anteriores en que se prescinde de la mezcladora como elemento independiente. El mezclado se realiza simultáneamente al fresado. La idea que inspira estos equipos de fresadora-extendedora es la de aprovechar la energía del fresado para obtener la mezcla dentro de la campana o carcasa de la fresadora. Para ello se dispone una rampa que inyecta la emulsión dentro de la cámara de fresado. Existen numerosos equipos de este tipo y prácticamente todos los grandes fabricantes de fresadoras disponen de equipos de fresadora-mezcladora derivados de sus fresadoras convencionales. El suministro de emulsión se realiza a través de una tubería flexible desde una cisterna que se solidariza con la fresadora-mezcladora por una barra rígida. La inyección de emulsión se regula mediante una bomba de caudal variable y se controla con contadores o caudalímetros, además se dispone generalmente de un sistema de retorno. Cuando se necesita incorporar agua, además de la emulsión, la mejor solución es disponer una segunda rampa de inyectores duplicando el sistema de impulsión y control. Como alternativa puede realizarse una conexión de las mangueras de emulsión y agua regulando el caudal de ambas bombas de forma que la proporción sea constante.

La incorporación de áridos para corrección granulométrica o de aditivos, tipo cal o cemento, se realiza extendiéndolos sobre la superficie a reciclar antes del paso de la fresadora-mezcladora. Algunos equipos permiten la dosificación de los aditivos pulverulentos en forma de lechada lo que elimina contaminaciones a áreas colindantes y problemas cuando hay viento y proporciona una mejor dosificación.

En este tipo de configuración el extendido se realiza mediante una extendedora independiente para lo cual el material fresado y mezclado se suele dejar sobre el firme formando un cordón. Debe tenerse en cuenta el efecto desecación para ajustar correctamente la humedad en el mezclado. Existe también la posibilidad de enviar el material mezclado a un camión o directamente a la tolva de la extendedora mediante la cinta cargadora de la fresadora. Esta opción no es muy recomendable por la facilidad con el material tratado con emulsión se adhiere a la cinta lo que acarrea problemas de segregación además de acortar la vida de la propia cinta elevadora.

Fresadora-Mezcladora-Extendedora

Como variante o mejora de la configuración anterior han surgido equipos que integran en una sola máquina las funciones de fresado, mezclado y extendido. En algún caso el mezclado es independiente del fresado y se realiza mediante una mezcladora de eje transversal que se ubica inmediatamente detrás de la fresadora.

Esta última configuración es la que más se está utilizando en España, con muy buenos resultados. Existen numerosos fabricantes que continuamente desarrollan e innovan para crear equipos cada vez más específicos para el desarrollo de esta tecnología. A continuación se definen tres de los más utilizados en este país de la empresa Wirtgen (2010).

Wirtgen 2100 DCR

La W-2100 DCR es una máquina de gran rendimiento adaptada fundamentalmente a los reciclados, aunque eventualmente se puede utilizar para trabajos de estabilización. Por contar con regla de extendido, esta máquina permite llevar a cabo trabajos de gran calidad en lo que a regularidad y homogeneidad del material reciclado extendido se refiere.

El campo de actividad en el que se aprovechan mejor sus cualidades, es el de los reciclados con emulsión en capas de espesores moderados (hasta 15 cm), ya que generalmente se buscan capas de base de características geométricas y mecánicas muy exigentes.

La 2100 DCR puede fresar al mismo tiempo las capas de aglomerado existentes y la base granular inferior; mezclando simultáneamente estos materiales con el nuevo ligante. Su motor; de 610 CV de potencia, le permite trabajar con espesores prácticos hasta 22 cm en un ancho de 200 cm.

Esta máquina cuenta entre otras con las siguientes prestaciones:

- Regulación automática de potencia.
- Instalación combinada de rociado con agua y ligante con equipo de dosificación asistido por microprocesador; que regula mediante una bomba volumétrica la cantidad de agua y ligante a utilizar en función del ancho y profundidad del fresado.
- Sistema electrónico de nivelación longitudinal y sensor electrónico de nivelación transversal.
- Dispositivo regulable para el extendido del material reciclado entre 2 y 3 cm con equipo de vibración y compactación.

Se puede aportar el agua mediante una cuba conectada mediante mangueras a la máquina al frente del tren de reciclado, o llenando esporádicamente el depósito de 4000 litros de la máquina recicladora.

Wirtgen WR-2500

La WR-2500 es una máquina de gran rendimiento especialmente versátil. Se adapta a los reciclados con cemento y emulsión y a las estabilizaciones a gran profundidad. No tiene regla de extendido, por lo que el material reciclado y/o estabilizado se suele extender y nivelar con ayuda de una motoniveladora.

Trabaja en un ancho de 250 cm y puede llegar a profundidades de 50 cm. Es una máquina de gran maniobrabilidad, ya que se mueve sobre cuatro grandes neumáticos motrices orientables.

Entre otras, cuenta con las siguientes prestaciones:

- Regulación automática de potencia
- Instalación combinada de rociado con agua, ligante y lechada de cemento o cal, mediante dos rampas independientes de 16 inyectores cada una
- Sistema electrónico de nivelación longitudinal y sensor electrónico de nivelación transversal.

Wirtgen WR-4200

La WR-4200 es una máquina de gran rendimiento utilizada en grandes proyectos de reciclado. El ancho máximo de trabajo es de 420 cm. Este ancho se puede modificar mientras el equipo trabaja hasta su anchura mínima de trabajo que es de 280 cm.

Tiene un doble tambor fresador que permite trabajar con rendimientos de hasta 400 t/h produciendo mezclas de muy buena calidad. Incorpora una regla extendidora equipada de tamper y equipo de vibración para realizar una precompactación

2.5.6.2.2. EQUIPOS DE COMPACTACIÓN

La compactación es una operación siempre delicada. La humedad del material extendido no siempre coincide con la óptima de compactación, si fuera excesiva puede que haya que esperar algún tiempo a que se seque el material.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que, debido a la menor densidad del material una vez reciclado, la superficie del material compactado va a quedar por encima de la rasante original, del orden de un 10% del espesor reciclado, por lo que hay que aplicar una compactación fuerte.

El tren de compactación para una capa reciclada suele estar formado por:

- Un rodillo vibratorio pesado, el cual hace que el material extendido y refinado termine por encajarse en el hueco abierto por el fresado,
- Un rodillo de neumáticos también pesado que, con baja presión de inflado, compacta el fondo de la capa reciclada y, con alta presión, ayuda a la eliminación del agua y cierra la superficie. (Potti et al., 2002b)

El Pliego para Reciclado de Mezclas Bituminosas en Frío “In Situ” de la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía, especifica que el rodillo vibratorio ha de ser de 15 toneladas y el de neumáticos de 35 toneladas y siete ruedas, pero el procedimiento ha de quedar fijado siempre en el tramo de prueba.

2.6. EXPERIENCIAS EN RECICLADO IN SITU EN FRÍO CON EMULSIÓN BITUMINOSA

2.6.1. ESTUDIOS DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN EN EUROPA

El reciclado de firmes es una técnica sostenible y amigable con el medioambiente. Desde hace años, la preocupación por minimizar el impacto ambiental que pueda producir la construcción ha impulsado proyectos de investigación a nivel europeo, que intentan desarrollar las técnicas de reciclado para favorecer su utilización y aunar criterios en el marco Europeo.

PROYECTO OPTEL

Este proyecto, desarrollado desde el año 1996 al año 2000 estaba incluido en el 4º Programa Marco Brite Euram III y su nombre completo es “Emulsiones bituminosas catiónicas de rotura lenta para construcción y conservación de carreteras”.

El primer objetivo perseguía adquirir un conocimiento en profundidad de los diferentes fenómenos que intervienen en el proceso de maduración de una emulsión y que debería conducir a la elaboración de una metodología más racional de formulación y de optimización de los aglomerados en frío.

Una característica esencial de la tecnología en frío reside en el hecho de que el ligante final se obtiene después de las operaciones de mezclado, extensión y compactación seguidas por un periodo de evolución in situ. Estas fases provocan fenómenos complejos de ruptura y de coalescencia sometidos, a priori, a la influencia de numerosos parámetros presentando un fuerte nivel de interacciones. Los trabajos de OPTEL han sido en este sentido (Eckmann et al., 2001) orientados según dos ejes principales:

- La comprensión en profundidad de los parámetros y fenómenos como el intercambio áridos/agua/emulsión, las características de las emulsiones y la simulación y comprensión de los fenómenos de ruptura y coalescencia.
- Un acercamiento global de los aspectos fundamentales de las técnicas de las mezclas en frío como la envuelta y manejabilidad, compactabilidad y maduración y propiedades mecánicas finales.

De entre los resultados (Potti, 2002c) más fructíferos de este proyecto se puede destacar la mejora en los conocimientos básicos de los siguientes campos:

- Intercambios entre áridos y fase acuosa
- Características interfaciales de los betunes
- Control de las propiedades de las emulsiones y especialmente de la granulometría
- Mecanismos de rotura, coalescencia y relajación de la forma
- Mecanismos de evacuación de agua

PROYECTO PARAMIX

El Proyecto PARAMIX es un proyecto de investigación que se inició en el año 2000 subvencionado por la Comunidad Europea en el marco de su programa Competitive and Sustainable Growth (PARAMIX, GRD1-2000-25168) Sus objetivos fueron eminentemente prácticos, enfocados por un lado, a obtener un mejor conocimiento de las técnicas de reciclado en frío y en caliente y por otro, a establecer una normativa y un modelo de cálculo matemático que permitieran un mejor control y proyección de las mismas.

Para ello se analizó el comportamiento estructural de diferentes actuaciones de rehabilitación con mezclas recicladas. En particular se analizaron las deflexiones medidas antes y después de las actuaciones de reciclado, así como los ensayos de laboratorio realizados sobre testigos extraídos de dichos tramos.

Entre las conclusiones finales de este estudio se pueden destacar las siguientes (Miró et al., 2007):

- Las técnicas de reciclado constituyen una alternativa viable para la rehabilitación de firmes, siendo necesario poner especial atención en el diseño y puesta en obra de las mezclas recicladas.
- Las actuaciones de rehabilitación con mezclas recicladas en caliente, permiten conseguir una disminución de las deflexiones mayor que la conseguida mediante los refuerzos convencionales. Aunque con las mezclas recicladas en frío esta disminución es menor, se obtiene un nivel de deflexiones comparable al obtenido con los refuerzos, aportando en cualquier caso una mejora de las capas deterioradas.
- El uso de betunes modificados de alto módulo en las mezclas recicladas en caliente y de emulsiones con rejuvenecedores en las mezclas recicladas en frío, parece aportar las mejores respuestas desde el punto de vista de capacidad estructural.
- La vida estimada de las diferentes tipologías de secciones rehabilitadas con mezclas recicladas, es superior a la que tendrían las secciones si se hubieran rehabilitado con un refuerzo convencional de acuerdo a la normativa vigente. No obstante, hay que tener muy en cuenta el espesor de las capas rehabilitadas, ya que las mezclas recicladas con buen comportamiento estructural pueden volverse críticas si el espesor no es suficiente.

PROYECTO SCORE

El proyecto SCORE se enmarca en el 5º Programa Marco de Investigación y Desarrollo de la Comisión Europea (Contrato nº G1RD-CT-2002-00742), técnicas de construcción medioambientalmente favorables (“EFCT- Environmentally Friendly Construction Technologies”). El título completo del proyecto de investigación fue: “Reciclado e frío optimizado basado en las ventajas de las microemulsiones bituminosas y la espuma de betún. Un sistema EFCT para la conservación y rehabilitación de carreteras”.

El objetivo global del proyecto fue profundizar en el conocimiento de las mezclas bituminosas recicladas en frío, y conseguir optimizar la técnica. El proceso de optimización cubrió las técnicas convencionales de reciclado con emulsión, así como el desarrollo de procesos innovadores mediante el empleo de la espuma de betún y de emulsiones micronizadas (o nanoemulsiones). Este proyecto planteó una sistemática que cubría todas las etapas, desde la caracterización de los materiales hasta la puesta en obra de la mezcla final y la valoración coste/beneficio desde los puntos de vista técnico, económico y medioambiental.

El proyecto SCORE trató de dar respuesta a una serie de limitaciones muy concretas que la técnica de reciclado in situ con emulsión o espuma de betún plantea. Algunas de las respuestas del proyecto a las limitaciones de la técnica se describen a continuación:

Calidad del firme y de los materiales a reciclar

Para poder definir adecuadamente los requisitos de calidad de los materiales a reciclar y de calidad del firme es preciso profundizar en la influencia que tiene el tamaño de las partículas de material fresado obtenido durante el proceso de reciclado. En la primera tarea del proyecto, “Efecto sobre los tamaños de las partículas”, se cuantificaron los parámetros fundamentales (velocidad de avance, profundidad, velocidad de giro, número de picas,...)

Uno de los objetivos del proceso de disgregación del firme debe ser reducir al mínimo las partículas superiores a 25 mm. En el análisis previo del estado de las capas del firme es imprescindible conocer el nivel de adherencia entre las capas para poder predecir el nivel de disgregación que puede alcanzarse. En situaciones donde se aprecia un despegue parcial de las capas a reciclar y especialmente si la capa superior está muy agrietada es conveniente realizar alguna de estas medidas (o las tres), según la situación planteada (Froumentin et al., 2006):

- Un fresado previo de ambas capas con un tambor dotado de suficiente número de picas
- Reducir la velocidad de avance y/o aumentar la velocidad de rotación del tambor
- No reciclar menos de 8 centímetros de espesor de pavimento

Además durante el proyecto se constató la diferente reactividad que presentan los fresados (Odie et al., 2006). Se verificó que los reciclados con espuma de betún son menos sensibles a la naturaleza de los fresados y a los parámetros de formulación que los reciclados con emulsión convencional o nanoemulsión.

Finalmente, tanto a nivel de laboratorio como en los tramos experimentales se observó que el grado de envejecimiento del fresado no ha tenido una influencia directa en las propiedades mecánicas de la mezcla.

Regeneración del ligante envejecido

Otro punto tratado por SCORE fue el análisis de las posibles interacciones entre el ligante viejo y el betún nuevo. El trabajo se realizó analizando la cinética de difusión entre el ligante viejo y el nuevo (Lancaster et al., 2006). Esta tarea se efectuó a través de medidas reológicas. Una capa de ligante viejo y otra del nuevo, se colocaron en cada plato de un reómetro del tipo plato-plato. El módulo del sistema se estudió como una función del tiempo y se pudieron interpretar en términos de los parámetros de difusión. En paralelo, se midieron

directamente cinéticas de difusión en mezclas para ver como los resultados a nivel teórico son aplicables a la situación real.

Estos y otros experimentos pusieron de manifiesto que a temperatura ambiente, la velocidad de difusión de un betún blando en un betún envejecido es extraordinariamente lenta, tanto como para pensar que en estas condiciones el tiempo necesario para que se realice la difusión, la regeneración del ligante envejecido, excede el periodo de servicio de la mezcla reciclada.

Una aportación muy interesante al proyecto fue la posibilidad de añadir aceites regenerantes al fresado, previamente a su empleo. El periodo óptimo es un tiempo de espera de una semana, lo que impide su aplicación en el reciclado in situ pero lo hace perfectamente viable en el reciclado en central.

Limitaciones climáticas

Una de las limitaciones actuales del reciclado en frío es la sensibilidad al agua y escasa cohesión inmediatamente después de su puesta en obra. Esta situación se agrava bajo condiciones climatológicas adversas, alta humedad y baja temperatura.

En el proyecto SCORE se estudió el empleo de nanoemulsiones en la técnica de reciclado en frío. La reducción del tamaño de partícula de la emulsión trae como consecuencia una mayor superficie específica, lo que se traduce en una mayor capacidad de envuelta. Dicho de otro modo, con el mismo contenido de ligante residual la sensibilidad al agua es inferior. Esta observación ha sido constatada a bajos y muy bajos contenidos de ligante residual. (Lesueur et al., 2006a).

Por otro lado la aportación de un filler activo, 0,5-1% cemento mejora notablemente tanto la cohesión como la resistencia conservada y el módulo sin perder su flexibilidad.

La cohesión inicial es un aspecto crítico en la velocidad de apertura al tráfico y en la posibilidad de que el proceso de reciclado sea menos dependiente de las condiciones climáticas.

Comportamiento mecánico de la mezcla

Es preciso diseñar y caracterizar adecuadamente la mezcla final, y los ensayos actuales de diseño, como se ha repetido a lo largo de esta investigación, no son los más adecuados. La carga aplicada en el ensayo de inmersión-compresión español y en el ensayo de Duriez francés es mucho más alta que la carga aplicada en obra. Es tan alta que en laboratorio se podría diseñar mezclas recicladas sin ligante y superar las especificaciones mínimas requeridas.

En los ensayos realizados en el reciclado con espuma de betún se ha puesto de manifiesto que las medidas de caracterización habituales, volumen de expansión y tiempo, no se han podido correlacionar con las propiedades mecánicas del material reciclado. Las modificaciones de las condiciones de fabricación de la espuma no han afectado de manera significativa a las propiedades mecánicas finales.

En la ejecución de unos tramos de prueba llevados a cabo por el proyecto SCORE se realizaron cuatro sistemas de compactación diferentes que permitieran establecer ciertas diferencias en la densidad inicial. (Leuseur et al., 2008) Se realizaron ensayos de compactación, con una profundidad de 8 cm y una velocidad de avance de 6m/min. La compactación estándar era:

- 2 pasadas de compactador liso de 15 t sin vibrar
- 2 pasadas vibrando
- 4 pasadas de compactador de neumáticos de 35 t

La compactación inversa consistió en empezar por las 4 pasadas del compactador de neumáticos, seguidas por el liso. Se llevó a cabo otra compactación idéntica utilizando un compactador liso de 19 t en lugar del compactador de 15 t, así como su inversa. Se observó que los cuatro planes de compactación no dieron resultados significativamente distintos con una compacidad final en torno a 86-88% de la densidad obtenida en laboratorio mediante el ensayo de Inmersión-Compresión.

Desde el punto de vista de la regularidad superficial del firme, el reciclado in situ llevado a cabo con los quipos actuales permite una mejora muy significativa. Se han obtenido reducciones superiores a un punto u próximas a dos puntos en el valor del IRI después de reciclar.

Otro aspecto clave es el grado de adherencia que se obtiene después del reciclado in situ realizado con equipos que efectúan simultáneamente la operación de fresado y la de extensión del material reciclado y que por tanto no realizan un riego de adherencia. Los datos obtenidos por el estudio reflejaron que las capas de mezcla reciclada presentan una unión a la capa inferior similar a la de las mezclas bituminosas convencionales.

La determinación del módulo de la mezcla también se analizó en este trabajo. En general se pudo afirmar que el módulo de rigidez es sobretodo dependiente de la naturaleza del material fresado. La utilización de los distintos ligantes (emulsión bituminosa, nanoemulsión o espuma de betún) tuvo una importancia menor. (Brosseaud et al., 2006)

Se comprobó también que la adición de cemento o cal, en cantidades inferiores al 1%, en las mezclas recicladas con espuma de betún era el medio más seguro para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla y la resistencia al agua. (Eckmann et al., 2006)

La posibilidad de fabricar nanoemulsiones bituminosas de ligante más duro abre la puerta a unas mejores propiedades mecánicas de la mezcla. En este proyecto se demostró que se obtenían módulos más elevados, un mes después de su compactación, con nanoemulsiones en lugar de emulsiones convencionales (Leseuer et al., 2006).

Protección de la mezcla reciclada

Una de las limitaciones actuales de las mezclas en frío es la necesidad de realizar una protección de la mezcla extendida. En muchos documentos relativos al reciclado de pavimentos en frío se establece que se debe demorar varios días desde la ejecución del reciclado antes de la aplicación de riego de curado para no dificultar la velocidad de evaporación del agua de la mezcla. Sin embargo, la experiencia obtenida por algunas empresas del sector (Odie et al., 2006; Potti et al., 2002 c) establece que el momento más adecuado para la aplicación del riego de curado debe ser en la misma jornada. Dependiendo de las condiciones climatológicas y del tipo de tráfico la apertura al tráfico puede ser realizada en pocas horas.

PROYECTO FÉNIX

Ante una situación social que reclama una mayor seguridad en el transporte y un desarrollo de la actividad productiva bajo unas prácticas más amigables con el medio ambiente se ha concebido el Proyecto Fénix: "Investigación estratégica en carreteras más seguras y sostenibles" (Proyecto Fénix, 2007). Representa el mayor esfuerzo en I+D realizado en Europa en el área de la pavimentación de carreteras con un presupuesto de 27 Millones de euros. Surgió de la 2ª Convocatoria CENIT 2007 y aglutina un consorcio 11 empresas y 15 centros de investigación españoles ya que este CENIT es un proyecto de participación exclusivamente nacional.

El proyecto de cuatro años de duración se estructura en torno a 12 líneas de investigación originales que van desde el desarrollo de nanomateriales activos en la reducción de emisiones de los vehículos, al desarrollo de nuevas tecnologías de producción en plantas asfálticas más eficientes, al desarrollo de nuevas mezclas bituminosas obtenidas mediante procedimientos más amigables con el medio ambiente y más seguras ante el riesgo de accidentes, al desarrollo de sistemas proactivos de la seguridad integrados en la carretera y el aprovechamiento energético de la irradiación solar sobre el pavimento filtrante.

Uno de los temas de desarrollo integrados en este proyecto es el *Reciclado en frío*. El objetivo de esta actividad es generar los conocimientos para desarrollar la tecnología del reciclado en frío y obtener mezclas asfálticas de altas prestaciones que permitan en un futuro su implantación a gran escala en toda la red viaria de España, y en tanto que se trata de tecnología exportable, en el resto del mundo.

La falta de información tecnológica previa que pueda suministrar información sobre las deficiencias y necesidades de este tipo de reciclado es un inconveniente para el estudio de esta tecnología. Para dar solución a este problema se ha generado un background de reciclados de pavimento bituminosos existentes en España, aportando datos técnicos sobre los estudios previos y posteriores al reciclado. Adicionalmente se ha realizado un seguimiento de tramos ya reciclados con diferentes tecnologías y se han evaluado sus propiedades mecánicas. Los ensayos realizados sobre los testigos procedentes de las capas recicladas en frío con emulsión ponen de manifiesto que las capas realizadas presentan una gran cohesión y un elevado módulo, similares al de una mezcla nueva en caliente tipo grueso.

Algunos resultados parciales de los trabajos realizados hasta ahora, dentro de la línea de *Reciclado en frío*, ponen de manifiesto que las capas recicladas con emulsiones con rejuvenecedores presentan una gran cohesión y un elevado módulo, similares al de una mezcla nueva en caliente tipo grueso. Estos resultados evidencian una difusión efectiva del rejuvenecedor a través del betún envejecido de la mezcla.

2.6.2. OTRAS EXPERIENCIAS

En este apartado se describen algunas de las actuaciones llevadas a cabo para mejorar e impulsar la técnica del reciclado in situ en frío con emulsión bituminosa.

El estudio de **emulsiones de altas prestaciones** para alcanzar cohesiones en tiempos menores es una línea de investigación desarrollada para solventar una de las limitaciones de la técnica del reciclado en frío: el curado lento de las emulsiones que implica la dilatación en el tiempo de la ejecución de las capas superiores.

Mediante la utilización de emulsiones sobreestabilizadas con rejuvenecedores de base bituminosa y diversos aditivos, se consigue reducir el tiempo de curado, y se obtienen mezclas que desarrollan resistencias elevadas en tiempos muy cortos y sus propiedades finales presentan tanto módulos adecuados como buena resistencia a la fatiga.

En el estudio Páez sobre nuevas tecnologías en el reciclado en frío de pavimentos asfálticos (Páez et al., 2009), se presenta la evolución del módulo de mezclas con emulsión de altas prestaciones, comparadas con mezclas fabricadas con emulsión convencional y con emulsión convencional con adición de cemento. Se llega a la conclusión, en ese estudio, que las mezclas con la emulsión desarrollada con el sistema de altas prestaciones alcanza valores mayores que las otras dos, como se aprecia en la Figura 9:

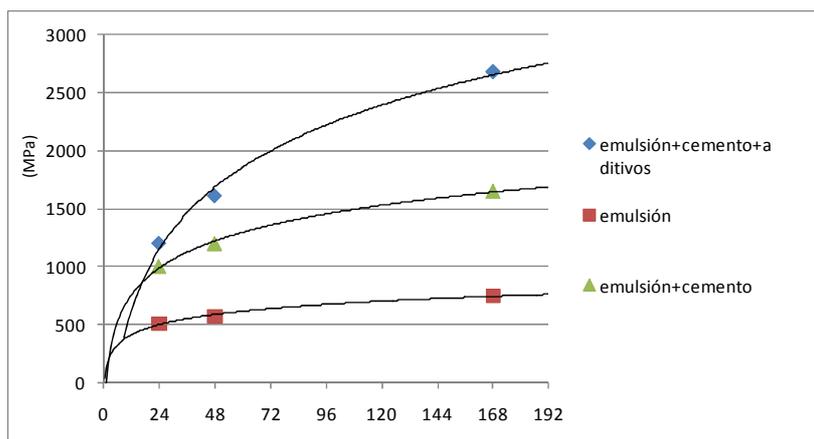


Figura 9. Evolución del módulo con el tiempo (horas).

Fuente: Páez et al., 2009

Sebaaly et al. (Sebaaly et al., 2004) en su proyecto desarrollado en el estado de Nevada (USA), utilizaron emulsión de altas prestaciones y realizaron un exhaustivo control de calidad y aseguramiento de la calidad durante todo el proceso. Llegaron a la conclusión de que se obtenía una mezcla que alcanzaba alto módulo determinado con el deflectómetro de impacto, altas resistencias a tracción indirecta y un menor tiempo de curado. Se pudo adoptar un mayor porcentaje de emulsión en la mezcla lo que se tradujo en una mejor cobertura de ligante sobre árido y se consiguió un comportamiento más durable y resistente a fisuración por fatiga térmica.

Otra línea de estudio para la mejora de la técnica del reciclado en frío, como se ha visto en los proyectos de investigación, es la utilización de **Nanoemulsiones**, emulsiones con partículas de betún de tamaño inferior a una micra.

Tienen una distribución de tamaño de partícula muy uniforme de la que derivan su estabilidad al almacenamiento y comportamiento en obra. Esta característica es la que hace variar su actuación, mejorando la estabilidad por un mejor empaquetamiento de los glóbulos de betún y un aumento de la superficie específica y consecuentemente de las cargas electrostáticas asociadas a la superficie de las partículas. Este aumento de superficie específica y de carga explica que cuando se realiza un tratamiento de mezcla con áridos, la cohesión y la adhesividad ligante-árido mejora notablemente. También la mayor uniformidad del tamaño de partícula incide en que los fenómenos de rotura de la emulsión sean más homogéneos y claros. Producto de esta mejor cohesión, también tienen tendencia a resistir mejor los efectos del agua y tráfico.

Ayala et al. llevaron a cabo un estudio a nivel de laboratorio comparando reciclados in situ en frío empleando una emulsión convencional, una con rejuvenecedor y una microemulsión. Llegaron a la conclusión de que la utilización de microemulsiones bituminosas para el caso de reciclados en frío era positiva ya que se alcanzaban prestaciones superiores. Los valores

de resistencia, como indicativo de cohesión, fueron en general mayores al utilizar microemulsiones, sin embargo, el curado de la mezcla, evaluado a través del módulo mediante tracción indirecta, no demostró una diferenciación clara con la utilización de microemulsión. (Ayala et al., 2010)

Lesueur et al., desarrollaron un proceso patentado para la emulsificación de productos viscosos, con el que pudieron fabricar emulsiones submicrónicas (o Nanoemulsiones) de betún. Este proceso patentado denominado *High Internal Phase Ratio, HIPR*, utiliza otros métodos distintos al tradicional molino coloidal con un alto contenido en la fase dispersa que permite un control preciso de la morfología de la emulsión. Emulsiones fabricadas con esta tecnología fueron utilizadas en reciclados in situ en frío, y se obtuvieron buenos resultados como una mayor envuelta, confirmada por los ensayos de Inmersión-Compresión. (Lesueur et al., 2010).

Otra técnica que se está desarrollando en el reciclado in situ en frío es la utilización de **betún espumado** en vez de emulsión. Se consigue inyectando en el tambor mezclador de la recicladora agua fría a presión y betún caliente; el agua, al entrar en contacto con el betún caliente, se transforma en vapor e interactúa con las partículas de betún, formando lo que se conoce como betún espumado. La baja densidad de esta espuma, facilita la mezcla con los áridos disgregados in situ.

Las ventajas de este tipo de reciclado frente a la técnica del reciclado tradicional con emulsión radican en un menor tiempo de curado de la mezcla, menos susceptibilidad a la humedad y la atenuación de la reflexión de grietas a capas superiores. (Lane et al., 2005; Chan et al., 2010)

Según analiza Yan et al (Yan et al., 2010), el comportamiento de las mezclas recicladas con emulsión presenta una rotura por fatiga plástica, debido a las características viscoelásticas de la mezcla resultante, mientras que cuando se utiliza betún espumado, la rotura por fatiga es más frágil

La **adición de cemento** a las mezclas recicladas in situ en frío con emulsión es una costumbre habitual con la finalidad de fortalecer este tipo de mezclas y disminuir su sensibilidad al agua. La técnica de mejorar el comportamiento de mezclas bituminosas mediante la adición de cemento se remonta a principios de 1970 (Head, R., 1974; Schmidt, R.J., 1973). Algunos estudios, como el de Niazi et al, (Niazi et al., 2010) demuestran que la adición de cemento Portland puede aumentar la estabilidad Marshall, el módulo resiliente, la resistencia a la acción del agua y a las deformaciones permanentes. Aunque Kavussi en su estudio apunta que un elevado contenido de cemento en estas mezclas favorece la aparición repentina de fisuras.

Anteriormente, Miró et al., (Miró et al., 2000) tras su estudio de cinco tipos de reciclado, con emulsión, con cemento y con ambos, llegó a la conclusión de que el uso de las mezclas

recicladadas con estos dos componentes juntos, mejoraban el comportamiento de la misma, aumentando su resistencia a la compresión y su módulo dinámico, sin alcanzar la elevada rigidez de las mezclas tratadas sólo con cemento. También se consigue mejorar el comportamiento a corto plazo, lo que es de especial interés para poder soportar el efecto del tráfico tras su ejecución.

La **adición de aditivos** es habitual en las técnicas de reciclado, especialmente si se detecta un deterioro excesivo del betún. El asfalto se vuelve frágil y quebradizo después de un largo periodo bajo las actuaciones del tráfico y/o de bajas temperaturas produciéndose la rotura de la película que recubre los áridos y permitiendo que el agua penetre y deteriore la mezcla asfáltica del pavimento. Para modificar estos defectos, se utilizan agentes rejuvenecedores del betún, persiguiendo las siguientes finalidades (Karlsson, R., 2002):

- Ajustar la viscosidad del betún existente a la viscosidad equivalente a la del nuevo betún.
- Restaurar el betún reciclado a sus propiedades químicas originales para asegurar su durabilidad.

Otro aditivo que se puede utilizar en los reciclados in situ en frío son las cenizas volantes. Su uso está muy extendido, sobre todo en USA, donde hay una normativa más específica que garantiza su idoneidad en la construcción de este tipo de reciclados. Como consecuencia de los ensayos realizados en diferentes estudios (Cross, 1995), se deduce que las cenizas actúan como un filler mineral, reduciendo la permeabilidad y mejorando el ratio de resistencia. El 10% de agua en la mezcla, aparece como la cantidad óptima en mezclas con este aditivo. La baja permeabilidad absoluta de estas mezclas también hace que el agua no penetre con facilidad y se evita el deterioro del pavimento. También se cree que gracias a las cenizas volantes, la temperatura de campo de aplicabilidad del material reciclado se puede reducir sustancialmente, posiblemente hasta 4°C, lo cual permite compactar la mezcla reciclada durante un mayor periodo del año que sin dicho aditivo.

Las conclusiones más importantes que se pueden extraer de este estudio analizado son:

- Las cenizas volantes hacen decrecer la permeabilidad absoluta de las mezclas recicladas in situ con emulsión bituminosa, incrementando así la resistencia de la mezcla a los efectos de la humedad.
- Las cenizas volantes incrementan la resistencia general de la mezcla y reducen las roderas en la misma.

En lo que se refiere al **comportamiento** a largo plazo de los materiales reciclados in situ en frío con emulsión está siendo estudiado cada vez con más profundidad. Kim et al. (Kim et al., 2010) en uno de sus estudios, analizan mediante lo que se denomina “pavement condition index (PCI)” el resultado de numerosas actuaciones de reciclado en Iowa (U.S.A.), comprobando que en algunos casos no se obtienen resultados satisfactorios debido a la

calidad de soporte de las capas inferiores, aunque en otros se han superado los períodos de vida útil esperados con un alto grado de calidad.

Algunos autores (Kim et al., 2010), analizan la evolución de los módulos de los materiales reciclados, y llegan a la conclusión de que pueden alcanzar el valores elevados (4.000 MPa) y que el resultado del módulo no es tan sensible a los cambios de temperatura como las mezclas bituminosas en caliente. A esta misma conclusión llega Gorski (Gorski, 2007) tras realizar un estudio sobre el reciclado ejecutado en la autopista A-4 de Milán a Turín (Italia) y observar que los testigos de obra alcanzan altos módulos y validan el resultado obtenido in situ con el curviómetro.

Charmot y Romero (2010) realizaron en laboratorio sobre testigos de obra ensayos de disipación de energía con la finalidad de predecir el comportamiento del reciclado tras su ejecución. Este parámetro, la energía de fractura, es una propiedad importante del material que puede ser utilizada para determinar la resistencia a la fisuración de los reciclados in situ en frío con emulsión bituminosa.

Las ventajas medioambientales de la técnica de reciclado in situ en frío con emulsión bituminosa han sido estudiadas con el programa denominado Pavement Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects (PaLATE), comparándolas con los efectos mediambientales de otras técnicas de rehabilitación tradicionales, llegando a la conclusión de que esta técnica era la mejor de las analizadas. (Cross et al., 2011)

2.7. CONSIDERACIONES FINALES

De la revisión de los estudios expuestos y de la literatura disponible, presentada en este estado del arte sobre mezclas recicladas in situ en frío con emulsión bituminosa, se pueden establecer las siguientes consideraciones:

- Existe una gran variación a nivel mundial de los procedimientos a seguir para definir la fórmula de trabajo de esta técnica, aunque la metodología, en líneas generales, presenta bastantes similitudes.
- Los ensayos de laboratorio utilizados para la definición de la fórmula de trabajo de la mezcla reciclada, no representan fielmente la mezcla final obtenida tras la ejecución en obra. El material reciclado fabricado en laboratorio presenta una densidad mayor que la del material ejecutado en obra, por lo que se ha detectado la necesidad de estudiar un procedimiento que permita reproducir en laboratorio un material lo mas similar posible al extendido en obra.
- Se desconoce el valor de la densidad in situ durante el proceso de maduración de la mezcla, y la densidad definitiva se determina en laboratorio sobre testigos extraídos de obra cuando el material ha perdido toda su humedad. Estudiar algún método de

medida de densidad in situ no destructivo y que permitiese controlar la evolución de la densidad y la humedad de la mezcla facilitaría el control de calidad de la actuación.

- El comportamiento de los firmes rehabilitados con esta técnica es aceptable siempre que su ejecución haya sido la correcta y los materiales utilizados, los adecuados. Si se pudiese disponer en laboratorio de este material en las mismas condiciones que en obra, se podría estudiar su comportamiento y estimar su respuesta in situ al entrar en servicio.
- Los módulos obtenidos con el paso del tiempo llegan a valores altos, alcanzando en ocasiones los valores proporcionados por una mezcla bituminosa en caliente convencional.
- En esta técnica de reciclado no se ha aplicado ninguna norma armonizada de las que entraron en vigor en el año 2008 tras el Mercado CE de las mezclas bituminosas. En estas normas europeas algunos métodos de ensayo se mantienen muy similares y en otros casos se modifican sustancialmente, tal es el caso del ensayo de Inmersión-Compresión, en el que se basa la definición de la fórmula de trabajo de los reciclados en frío, que ha sido sustituido por el ensayo de Sensibilidad al Agua para la determinación de la susceptibilidad al agua de las mezclas bituminosas. En estas normas armonizadas también se establecen nuevos procedimientos de compactación en laboratorio, como es el caso de la UNE-EN 12697-33 que describe la fabricación de probetas paralelepípedas con el compactador de segmentos de rodillo. Ninguna de estas modificaciones ha afectado al procedimiento de diseño y fabricación de mezclas bituminosas recicladas in situ, cuando se presenta como una buena oportunidad el estudio un nuevo proceso de fabricación de probetas en laboratorio para poder reproducir reciclados con la misma densidad que en obra.

Es evidente, tras el estudio realizado en este apartado, que el reciclado in situ en frío con emulsión bituminosa es una técnica de conservación y rehabilitación de firmes, amigable con el medioambiente, que reutiliza materiales considerados, en principio, como residuo de construcción y que, además, presenta un comportamiento estructural satisfactorio. Sin embargo, es necesario profundizar en los métodos de formulación de la mezcla con el objeto de reproducir en laboratorio un material similar al extendido en obra, ya que en todos los casos analizados, los ensayos de laboratorio utilizados para determinar las fórmulas de trabajo, dan lugar a un material con densidad mayor que la que presenta el reciclado en obra.

La exploración de la técnica realizada en este Estado del Arte justifica la realización de este trabajo de investigación y reafirma los objetivos planteados en el primer capítulo de este trabajo.



METODOLOGÍA

3 METODOLOGÍA

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se expone la metodología seguida durante el desarrollo de la investigación. Para poder alcanzar los diferentes objetivos propuestos se establece una metodología en la que el estudio se estructura en distintas fases ordenadas de manera cronológica.

Para la realización de los trabajos de esta investigación, es necesario, en primer lugar, identificar una actuación de reciclado in situ en frío con emulsión bituminosa en ejecución, de la que obtener el material a ensayar. Con este material, se buscará un procedimiento de compactación que permita reproducir un material reciclado en laboratorio lo más parecido posible al material reciclado fabricado y extendido en obra. El equipo que se utilizará para estudiar la compactación en laboratorio es el compactador de segmentos de rodillo.

Una vez definido un protocolo adecuado de compactación para este tipo de mezclas, se elaborará una batería de probetas paralelepípedas de las que se extraerán testigos, denominados a partir de ahora testigos de laboratorio, para analizarlos mediante ensayos habituales de caracterización mecánica de mezclas bituminosas. A la vez, se recopilarán testigos de las distintas obras de reciclado, denominados a partir de ahora testigos de obra, para identificar de la misma manera la mezcla que realmente entra en servicio. Todas estas etapas de las que consta este trabajo de investigación, quedan reflejadas en la siguiente figura:

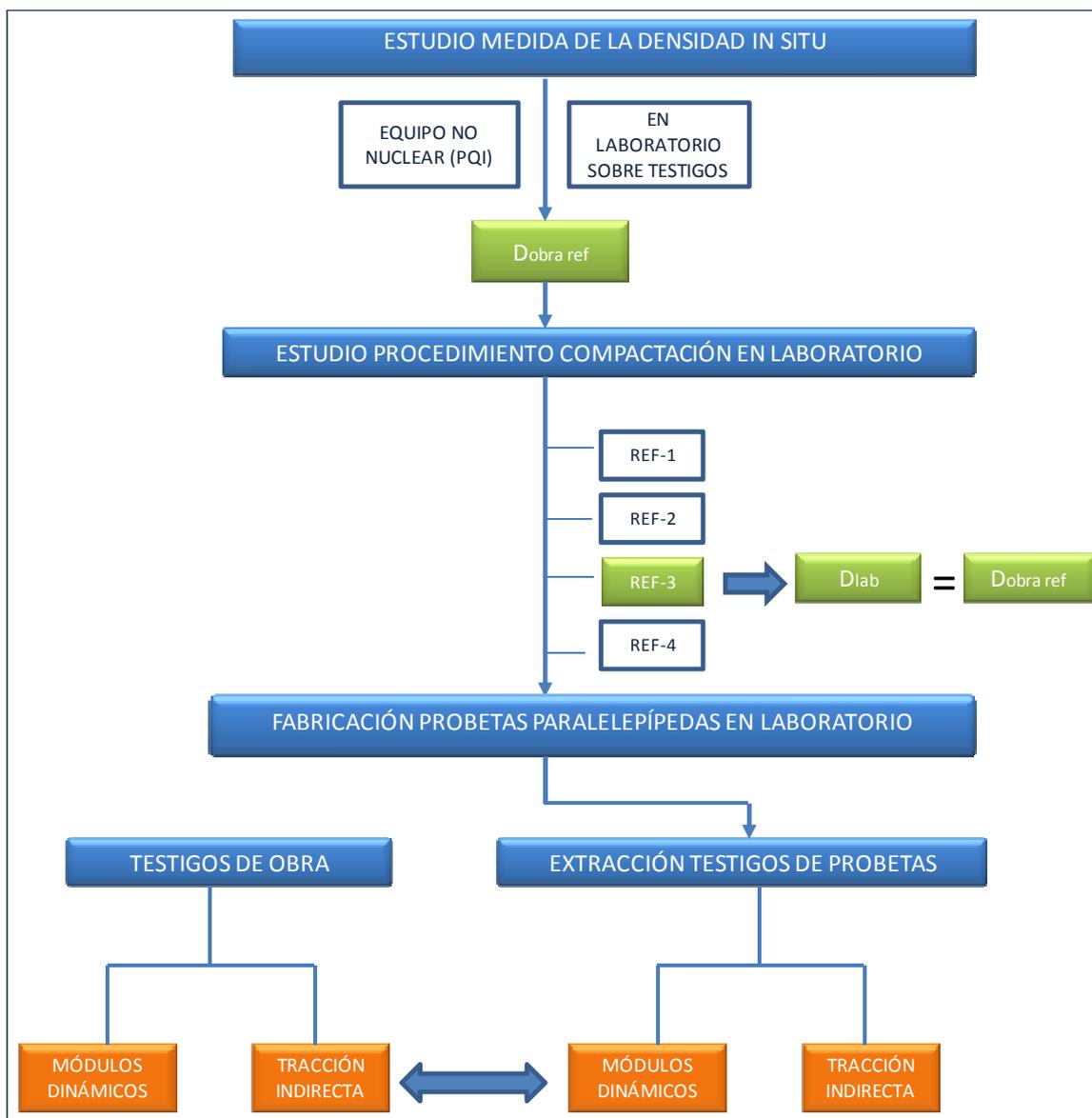


Figura 10. Esquema de los trabajos de la investigación

En el siguiente epígrafe se describen con detalle cada uno de los pasos a seguir en esta investigación, pero previamente se presenta una descripción aclaratoria de la terminología empleada en este trabajo:

Se ha expuesto en apartados anteriores que la principal deficiencia que presenta la técnica del reciclado in situ en frío con emulsión bituminosa es la diferencia entre la densidad alcanzada en el material utilizado en laboratorio para su diseño y control del reciclado y la densidad que realmente alcanza éste en obra. La densidad exigida tiene que ser igual o superior a la densidad Próctor, determinada en laboratorio sobre probetas de material fabricado mediante compactación por impactos, y más baja siempre que la alcanzada mediante compresión estática en la fabricación de probetas para el ensayo de Inmersión-Compresión, sobre las que se determinan las características de la mezcla. Son muchas las

densidades que hay que considerar en el desarrollo de la técnica de reciclado en frío con emulsión bituminosa. A continuación se presentan las terminologías utilizadas en este trabajo de investigación para las distintas “densidades” que aparecen en la técnica del reciclado en frío, tanto en la primera etapa de diseño en laboratorio, como posteriormente en la ejecución y control en obra.

- ***D_{I-C}***: *Densidad Inmersión-Compresión: es la densidad obtenida en laboratorio en las probetas de material reciclado fabricadas para realizar el ensayo de Inmersión-Compresión. Se determina tras un proceso de curado durante tres días en estufa a 50°C mediante superficie seca saturada.*
- ***D_{PMref}***: *Densidad Próctor Modificado: es la densidad determinada según lo especificado en el ensayo Próctor Modificado recogido en la UNE 10350, sobre el material fresado. La densidad se define mediante la relación entre el peso que se obtenido tras fabricar la probeta, y el volumen, que es conocido. Sirve de referencia para la puesta en obra.*
- ***Dobra_{ref}***: *Densidad de obra de referencia: densidad alcanzada en obra una vez que la mezcla ha perdido toda su humedad, medida en laboratorio por el método de superficie seca saturada sobre testigos extraídos con sonda rotativa en obra. Debe ser superior al 100% *D_{PMref}*. Es la densidad que se desea reproducir en laboratorio.*
- ***D_{lab}***: *Densidad alcanzada en laboratorio: es la densidad de las probetas que se fabrican en laboratorio con los procedimientos de compactación a estudiar, determinada también mediante superficie seca saturada tras curado en estufa hasta peso constante. Se busca que sea el 100% de *Dobra_{ref}**

3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En los siguientes epígrafes se definen con detalle cada uno de los pasos seguidos en esta investigación.

3.2.1. DETERMINACIÓN DEL CASO CONCRETO DE ESTUDIO

Durante el periodo comprendido entre los años 2006 y 2009, la Universidad de Granada y la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía desarrollaron un proyecto de investigación denominado “Análisis del comportamiento de firmes reciclados” (Consejería de Obras Públicas de la Junta de Andalucía et al., 2006), en el que se analizaban las características de los firmes ejecutados mediante técnicas de reciclado realizados en los

últimos años en esta Comunidad Autónoma. En el momento en el que comienza este trabajo, se estaban ejecutando cuatro obras de reciclado con esta técnica:

- Refuerzo de la carretera A- 431. Tramo PK 0+000 al 58+000. Córdoba
- Refuerzo del firme en las carreteras A-4152 (Venta de los Moriscos – intersección A- 341) y A-7204 (Venta Baja – A-45). (Málaga) [De aquí en adelante A-7204 Málaga]
- Renovación del firme de la carretera A-351, del P.K. 0+000 al P.K. 34+700 de Écija a Osuna (Sevilla). [De aquí en adelante A-351 Écija-Osuna]
- Renovación del firme de la carretera A-472, de San Juan del Puerto a Sanlúcar la Mayor. [De aquí en adelante A-472 Huelva]

En la ciudad de Sevilla, el Ayuntamiento, realizó durante el verano del año 2009 la obra de acondicionamiento y refuerzo del firme en la Avenida Kansas City con la técnica de reciclado in situ en frío con emulsión bituminosa. Se tuvo acceso a esta actuación y también se tomó material para utilizarlo en la definición del procedimiento de compactación.

En la siguiente foto se marca la ubicación de todas estas actuaciones de reciclado de firmes realizadas durante el periodo de ejecución de esta investigación.



Figura 11. Ubicación de las distintas actuaciones de reciclado

De estas obras, de las que se presenta una breve descripción a continuación, se toma el material fresado necesario para la realización este proyecto, salvo de la situada en la provincia de Córdoba, cuya ejecución estaba finalizando cuando comenzó esta investigación y sólo sirvió para análisis y toma de contacto con este tipo de técnica.

Refuerzo de la carretera A-431. Tramo PK 0+000 al PK 58+000. (Córdoba)

La carretera A-431, de Córdoba a Peñaflores (provincia de Sevilla), es una carretera de 9 metros de ancho de doble sentido de circulación situada en el oeste de la ciudad. En las obras de acondicionamiento y refuerzo de dicha carretera se ha previsto la ejecución de los siguientes tramos de reciclado in situ en frío con emulsión bituminosa:

- 1- Entre los P.K. 2+000 al 12+000 se localiza una zona de vía rápida, con dos calzadas, donde se pretende reciclar el carril derecho de cada una de ellas
- 2- Entre los P.K. 19+000 al 27+000: en esta zona se ha previsto reciclar toda la calzada. La sección tipo es la de carretera convencional.

Tras los correspondientes estudios previos de la carretera mediante testigos y mediante las catas realizadas, se definen dos tipos distintos de reciclado, con las siguientes proporciones de emulsión y agua para cada uno de ellos:

Fórmula de trabajo tipo 1:

- Emulsión: 3,0%
- Agua de aportación: 2,5%

Fórmula de trabajo tipo 2:

- Emulsión: 3,5%
- Agua de aportación: 3,5 %

En ambos casos la emulsión utilizada ha sido ECL-2 y el espesor de reciclado ha sido de doce centímetros (12 cm) Sobre esta capa de material reciclado se han extendido siete centímetros (7 cm) de mezcla S-20 como capa intermedia y tres centímetros (3 cm) de mezcla F-10 como capa de rodadura.

La maquinaria empleada está compuesta por dos Fresadoras-Recicladoras Wirtgen GmbH 2100 DCR en paralelo. Ésta es una máquina de gran rendimiento. Cuenta con una regla de extendido que permite realizar trabajos de gran calidad en lo que a regularidad y homogeneidad del material reciclado extendido se refiere. Dicha máquina abarca las funciones de fresado; disgregación y homogeneización del material con aportación de la emulsión y agua; y, reparto transversal del material suelto, nivelación y extensión. Esta fresadora tiene una anchura de fresado de 200 cm y una profundidad máxima de fresado de 22 cm. Actúa sobre el firme con la acción de un tambor transversal giratorio, dotado de picas de acero de gran dureza. La máquina se mueve sobre orugas y actúa sobre la capa de mezcla bituminosa trasladando mecánicamente el material al sinfín de una mezcladora extendedora móvil que trabaja simultáneamente. Lleva incorporado una maestra y pisón para la extensión y precompactación de la mezcla definitiva. (Figura 12).



Figura 12. Equipo de reciclado

La carcasa del rotor se utiliza como cámara de mezclado. En esta caja mezcladora se inyecta a presión un caudal controlado de emulsión asfáltica y agua. El suministro de fluidos se hace desde una cisterna nodriza que se mueve vinculada a la máquina de reciclado. La incorporación de la emulsión se hace por una batería de difusores, fácilmente limpiables, revisables y cambiables, que la reparten

uniformemente pulverizada. La presión se obtiene con una bomba de desplazamiento

positivo, generalmente asociada al caudalímetro. El agua se aporta mediante el llenado del depósito de 4000 litros de la máquina.

El motor básico de la máquina tiene una potencia de 600 CV que se regula de forma automática. La configuración de trabajo empleada estaba formada por una cisterna de emulsión, una W-2100-DCR, un compactador liso vibratorio pesado de 15 toneladas, y un compactador de neumáticos de 35 toneladas y 7 ruedas.

Refuerzo del firme de la carretera A- 7204 (Málaga)

Durante el verano de 2008, en los meses de julio, agosto y septiembre, se llevaron a cabo las obras de refuerzo del firme en la A-7204 en la provincia de Málaga, entre el P.K. 0+000 y el P.K. 41+800. El tramo de carretera sobre el que se realizó la actuación poseía un ancho de calzada de 7 m, con un carril para cada sentido de 3,5 m de anchura y un arcén a cada lado de 1 m de ancho.

Tras los trabajos previos de caracterización de material existente a partir de las muestras de fresado obtenidas en diferentes puntos de la carretera, la fórmula de trabajo que se empleó fue:

- Emulsión: 3%
- Agua de aportación: 2,3%

La emulsión utilizada es del tipo ECL-2. El espesor de la capa de reciclado ha sido de diez centímetros (10 cm) y sobre ella se ha extendido una capa de seis centímetros (6 cm) de mezcla bituminosa abierta en frío tipo AF-12.

El conjunto de maquinaria utilizada para la ejecución de las obras fue un camión cisterna con la emulsión a aportar a la mezcla, una recicladora modelo Wirtgen 2100 DCR (encargada del fresado, mezcla y extendido), un rodillo vibratorio de 15 toneladas y un compactador de neumáticos de 35 toneladas.

Renovación del firme de la A-351 del P.K. 0+000 al P.K. 34+700 (Écija-Osuna)

Otra de las obras ejecutadas durante el transcurso del estudio de seguimiento de reciclados fue la renovación del firme de la carretera A-351, en la provincia de Sevilla, entre los municipios de Écija y Osuna durante los meses de mayo y junio de 2008. El motivo principal de esta actuación fue la presencia de numerosos defectos estructurales (baches, fisuraciones, roderas y ondulaciones) en la mayor parte del firme, como se aprecia en la Figura 13.



Figura 13. Detalle del estado del firme antes de la actuación

El tramo de carretera tiene una longitud de 34.700 metros y está formada por una calzada única con un solo carril por sentido. La sección de la vía es de 7 m de anchura de calzada, con dos carriles de 3,5 m y arcenes de 1,4 m a cada lado.

Tras un análisis previo de la carretera y de muestras de fresado obtenidas de diferentes puntos kilométricos, se apreció falta de homogeneidad tanto en espesores como en composición del firme (tipo de árido, porcentaje de betún residual,...). La elección de la emulsión a emplear (una emulsión catiónica de rotura lenta), se hizo en base a las características del betún residual existente en las muestras del fresado. Dada esta heterogeneidad de la calzada, se establecieron distintos tramos de actuación en los que se adecuó la fórmula de trabajo empleada a las características existentes, definiéndose una fórmula de trabajo para los tramos con árido calizo y otra fórmula de trabajo para los tramos de árido silíceo.

Ambas fórmulas de trabajo utilizadas se establecieron en base a los datos obtenidos tras el análisis de las muestras de fresado de los distintos tramos, siendo las dosificaciones finales las siguientes:

Fórmula de trabajo tramo silíceo:

- Emulsión: 3,5%
- Agua de aportación: 2%

Fórmula de trabajo tramo calizo:

- Emulsión: 3%
- Agua de aportación: 2%
- Cemento: 0,5%

En ambos casos el espesor de reciclado ha sido de 8 centímetros sobre los que se ha extendido una capa de mezcla bituminosa tipo S-20 de seis centímetros (6 cm) de espesor y otra capa de mezcla tipo S-20 de cinco centímetros (5 cm) de espesor como capa de rodadura.

La maquinaria empleada en la ejecución de las obras fue un “tren” compuesto por un camión de aporte de cemento sobre la superficie de la calzada, un camión cisterna conectado a la recicladora con la emulsión a adicionar en la mezcla, un camión eventual de aporte de agua, una recicladora modelo Wirtgen 2200 CR, un rodillo vibratorio de 25 toneladas, y un compactador de neumáticos de 35 toneladas.



Figura 14. Tren de reciclado



Figura 15. Compactación de la mezcla reciclada

Renovación del firme de la A-472 del P.K. 0+000 al P.K. 60+830 (Sanlúcar la Mayor- San Juan del Puerto)

La última obra fue la renovación del firme de la carretera A-472 entre el municipio sevillano de Sanlúcar la Mayor y el onubense de San Juan del Puerto. Dicha obra transcurrió durante los meses de abril y mayo de 2009.

El tramo de carretera sobre el que se actuó tiene una longitud de 60.830 m, desde el PK 0+000 hasta el PK 60+830, y la técnica de reciclado in situ con emulsión bituminosa se llevó a cabo en los tramos P.K. 18+700 al P.K. 21+600, P.K. 25+200 al P.K. 27+800, P.K. 33+000 al P.K. 38+000 y P.K. 47+560 al P.K. 54+400. El espesor de la actuación ha sido de 80 mm en todos los tramos.

Se trata de una carretera de calzada única con un carril por sentido de 3,5 m de ancho y arcenes de 1,5 m.



Figura 16. Recicladora antes de comenzar los trabajos de rehabilitación en la A-472

Tras los diferentes análisis llevados a cabo en laboratorio, la emulsión elegida fue una emulsión catiónica de rotura lenta, y la fórmula de trabajo empleada en el tratamiento del firme fue:

- Emulsión: 3,5 %
- Agua de aportación: 2,8 %
- Cemento: 1%

El tipo de emulsión empleada ha sido ECL-2. El espesor de la actuación fue de ocho centímetros (8 cm) sobre los que se extenderían una capa intermedia de mezcla bituminosa tipo S-12 de cinco centímetros (5 cm) de espesor y una capa de rodadura de mezcla tipo F-10 de tres centímetros de espesor (3 cm).

La maquinaria empleada fue la misma que en la obra de renovación del firme de la A-351, es decir, un tren de trabajo compuesto por dos camiones cisterna, uno con emulsión y otro con cemento, una recicladora Wirtgen 2200 CR, un rodillo vibratorio y un compactador de neumáticos. En las fotos 7 y 8 se muestran dos detalles del extendido de la mezcla reciclada y de los equipos de compactación.



Figura 17. Extendido de la mezcla reciclada



Figura 18. Compactación de la mezcla reciclada

RENOVACIÓN DE LA AVENIDA KANSAS CITY. SEVILLA

Además de estas tres obras de la Consejería de Obras Públicas, se ejecutaba en Sevilla la obra de “Mejora y Refuerzo del firme en la Avenida Kansas City” en la que se aplicaba la técnica de reciclado in situ en frío con emulsión bituminosa para la renovación de la capa asfáltica deteriorada. De esta obra también se pudo recopilar material fresado para el estudio del procedimiento de compactación en laboratorio para el material reciclado.

Esta obra se ejecutó durante el verano del año 2009, y se localiza en la entrada a la ciudad de Sevilla por la Autovía del Sur (Nacional IV).

La fórmula de trabajo utilizada se determinó tras los estudios previos de los materiales existentes y las proporciones definidas fueron las siguientes:

- Emulsión: 3,2%
- Agua de aportación: 2,2%

La emulsión empleada fue una emulsión catiónica de rotura lenta, tipo ECL-2. El espesor de reciclado fue de nueve centímetros (9 cm) y sobre él se extendió una capa de mezcla bituminosa tipo F-10 de tres centímetros (3 cm) de espesor como capa de rodadura.

La maquinaria utilizada consistió en un equipo de reciclado compuesto por una recicladora Wirtgen 2100 DCR, un rodillo vibratorio de 15 toneladas y un compactador de neumáticos de 35 toneladas.

3.2.2. DENSIDAD DE REFERENCIA. NUEVO PROCEDIMIENTO MEDIDA EN OBRA

Tras disponer de material para trabajar en laboratorio hay que determinar la densidad de referencia para fabricar las probetas. Esta densidad de referencia es la real alcanzada en obra, ($Dobra_{ref}$), la que tiene la mezcla tras la pérdida completa de humedad, tanto la propia de la emulsión como la añadida para la compactación y preenvuelta.

Hasta ahora, el procedimiento de medida de densidad en mezclas recicladas, se realiza mediante testigos en el momento en el que el material ha perdido la humedad y se puede proceder a su extracción. El equipo nuclear de medición de densidad in situ se utiliza para comprobar la evolución de la densidad en obra. Este equipo, diseñado para ser utilizado en suelos granulares, se basa en el conteo de iones hidrógeno, por lo que al utilizarlo en mezclas asfálticas, con materiales hidrocarbonados en su composición, los resultados de la densidad no son los deseables ya que falsea los resultados al contar los iones hidrógeno de este material como si fueran los correspondientes a la humedad del suelo. Para trabajar con este equipo en mezclas bituminosas es necesario establecer un coeficiente de corrección a partir de un ajuste entre las medidas tomadas in situ y las determinadas sobre testigos previamente extraídos de la obra.

Existe en el mercado un nuevo dispositivo no nuclear para determinación de la densidad in situ de mezclas asfálticas denominado PQI (Pavement Quality Indicator). Se analizará en este trabajo si este equipo permite determinar in situ y de manera inmediata la densidad del material reciclado recién extendido.

El equipo PQI utiliza ondas eléctricas para medir la constante dieléctrica mediante un plato detector del campo eléctrico. La densidad de la mezcla bituminosa es directamente proporcional a la constante dieléctrica del material, y los dispositivos electrónicos del equipo convierten las señales de campo en interpretaciones de la densidad, reflejando los resultados en la pantalla. El procesador de datos calcula la densidad, corregida por la humedad que pueda estar presente en el pavimento.

Este dispositivo utiliza un voltaje continuo de baja frecuencia, determinando la densidad, o nivel de compactación, por la respuesta del campo eléctrico del detector del dispositivo, a los cambios en la impedancia eléctrica de la matriz del material, que es función de la constante dieléctrica del material y del aire atrapado en los huecos de la capa compactada. Cuando la compactación se incrementa, la constante dieléctrica combinada aumenta, ya que disminuye el porcentaje de aire en la mezcla, que tiene una constante dieléctrica mucho menor que la del material. El equipo, permite realizar una calibración y funciones de corrección precisas, y almacena varias mediciones para la recuperación y análisis posterior de datos. (Trans Tech Systems, 2003)

Un estudio realizado por Romero y financiado por el Fondo Federal de Reserva del Estado

(FHWA) de Estados Unidos, para probar la calidad en las determinaciones con el PQI, llegó a la conclusión de que “para el control de calidad durante la pavimentación es un método perfectamente aceptable, que provee resultados por lo menos tan buenos como el nuclear, y por su rapidez, se ha colocado como un procedimiento idóneo para las mediciones de densidad in situ”. (Romero, 2002)

El equipo PQI muestra como resultado el valor de la densidad en el punto de medida, la temperatura de la mezcla y la humedad contenida en ella. Como datos de partida, se registran previamente el espesor de la capa, el tamaño máximo de árido, las unidades en las que se expresa la densidad y si se quiere, la densidad teórica de referencia, sobre la cual el aparato devolverá el porcentaje de compactación.

En las obras en ejecución se realizará un estudio de densidades con los distintos métodos existentes y se determinará la viabilidad o no de este equipo de medida de densidades en mezclas con emulsión.

Una vez determinada la densidad de referencia, es decir, la densidad final alcanzada en obra, se continuará con el estudio de un procedimiento de compactación en laboratorio para mezclas recicladas in situ en frío con emulsión.

3.2.3. PROCEDIMIENTO DE COMPACTACIÓN EN LABORATORIO

El siguiente paso de este trabajo es determinar un procedimiento de compactación que nos permita reproducir en laboratorio el material reciclado en las mismas condiciones que tras ser ejecutado en obra. Es decir, un material con la misma densidad de referencia definida en el apartado anterior.

Para preparar probetas en laboratorio se pueden utilizar diversos métodos de compactación:

- Impactos
- Compresión estática
- Compactación vibratoria
- Compactador giratorio
- Compactador de segmento de rodillo

La *compactación por impactos* se recoge en la norma UNE-EN 12697-30: “Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 30: Preparación de la muestra mediante compactación de impactos”. Esta norma se aplica a mezclas bituminosas (tanto fabricadas en laboratorio como obtenidas mediante toma de muestras a pie de obra) en

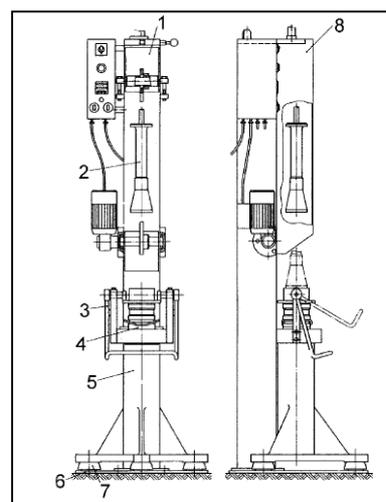


Figura 19. Compactador de impactos.
Fuente: Norma UNE-EN 12697-30

las que la granulometría del árido no sea mayor de 22,4 mm. La mezcla se compacta por medio de un peso deslizante que se deja caer desde una altura establecida, un número determinado de veces, dentro de un periodo de tiempo especificado, sobre la parte superior de la probeta de mezcla bituminosa, colocada sobre el pedestal de compactación. En la Figura 19 se muestra un esquema del equipo.

La norma exige que el equipo disponga de un contador para registrar y contar los golpes. Las probetas así compactadas pueden ser utilizadas para el cálculo de densidades y de huecos, para la determinación de la sensibilidad al agua, para la pérdida de partículas de las mezclas drenantes y como referencia para las probetas de pista.

En mezclas con elevado contenido de agua en su composición, no es conveniente la utilización de este método de compactación. El agua no es compresible y por lo tanto la compactación por impactos presentará siempre problemas en su ejecución.

La *compresión estática* contemplada en la norma NLT 162: "Efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas bituminosas compactadas. Ensayo de inmersión-compresión" es demasiado intensa, ya que se aplica una fuerza de 170 kN para compactar las probetas. En un estudio desarrollado por Miró et al. (2000) sobre reciclados con emulsión y

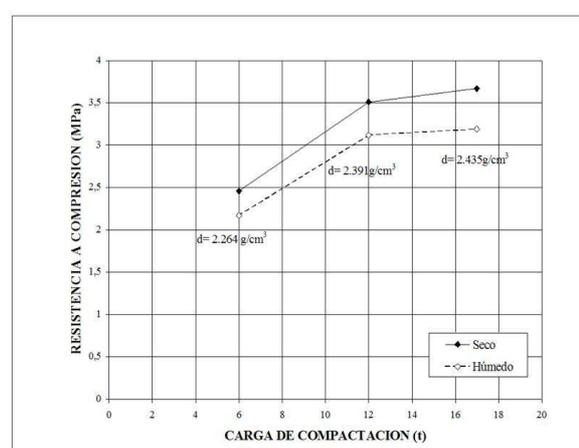


Figura 20. Variación resistencia a compresión frente a carga de compactación Fuente: Miró et al. 2000

cemento, se analizó cómo variaba la resistencia a la compresión de mezclas bituminosas recicladas en frío, en función de la carga aplicada para su fabricación. Quedan reflejados los resultados de este estudio en la Figura 20, donde se aprecia el aumento de densidad y resistencia a compresión al elevar la carga de compactación, pero, no muy significativo a partir de 12 toneladas de carga de compactación.

La *compactación vibratoria*, recogida en la norma UNE-EN 12697-32, se aplica a mezclas inconsistentes y se utiliza para establecer una densidad de referencia para una mezcla bituminosa, de acuerdo con los procedimientos descritos en la Norma EN 12697-9, o para determinar la compactabilidad de una mezcla bituminosa, según se describe en la Norma EN 12697-10. Sólo se utiliza para mezclas con tamaño máximo de árido superior a 22 milímetros. La compactación vibratoria se realiza mediante un martillo vibratorio eléctrico provisto de dos pisones metálicos de 102 mm y 146 mm de diámetro (Figura 21). Después de la mezcla, preparación y acondicionamiento de una probeta en el laboratorio, el calentamiento de un testigo extraído de la superficie de la carretera hasta la temperatura de compactación, o el acondicionamiento del material mezclado en la planta de producción, el

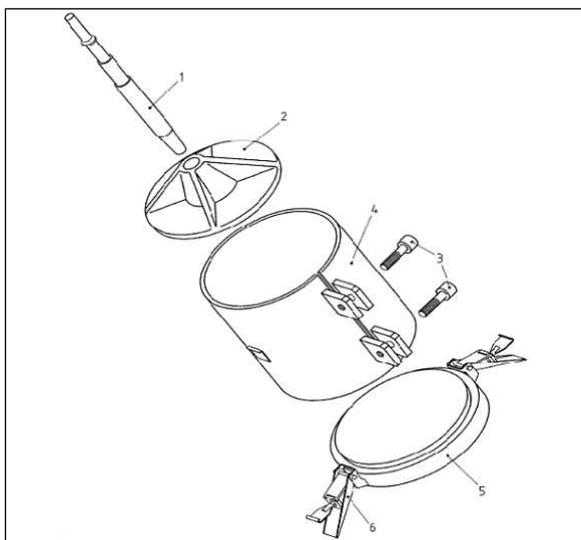


Figura 21. Conjunto para compactación vibratoria
Fuente: Norma UNE-EN 12697-32

material se coloca en un molde normalizado, que dispone de una placa de asiento y de un manguito, y se compacta mediante el martillo vibratorio. Una vez terminada la compactación, se determina la densidad aparente de la probeta compactada, de acuerdo con la Norma EN 12697-6:2003+A1.

La *compactación giratoria*, descrita en la norma UNE-EN 12697-31: “Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 31: Preparación de la muestra mediante compactador giratorio”, se consigue por la acción simultánea de una compresión

estática débil, y la acción de deslizamiento resultante del movimiento del eje de la probeta que genera una superficie cónica de revolución de vértice O y cuyo ángulo en el vértice es 2ϕ , mientras que los planos de la base de la probeta permanecen aproximadamente perpendiculares al eje de la superficie cónica, como se muestra en la Figura 22.

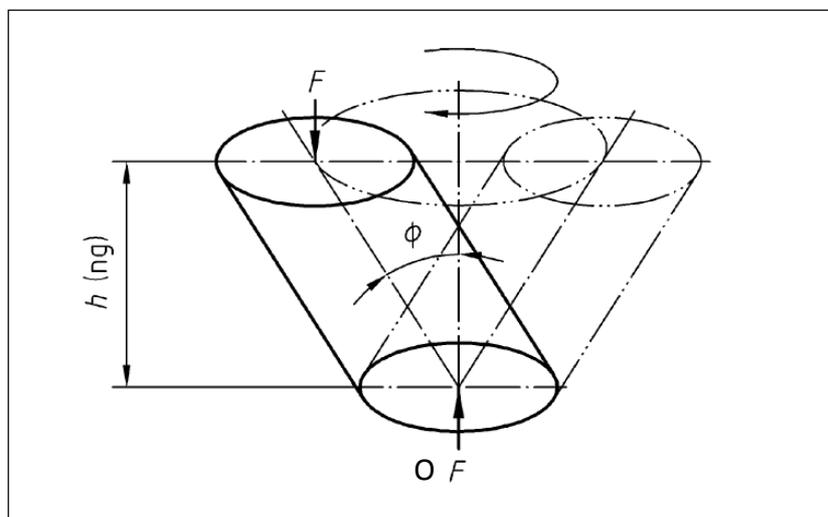


Figura 22. Diagrama del movimiento de la probeta
Fuente: Norma UNE-EN 12697-32

Esta norma se aplica a mezclas bituminosas (tanto elaboradas en laboratorio como extraídas mediante muestreo en la zona de trabajo) cuya granulometría máxima no sea superior a 31,5 mm. La norma no especifica el número de giros para compactar las probetas. Sin embargo, la Norma UNE-EN 13108-20 especifica diez energías de compactación diferentes, aplicando entre 10 y 240 giros.

Este método de compactación se utiliza en Francia (LCPC) y Estados Unidos (Superpave) desde hace ya tiempo. En España, en los últimos años se están desarrollando numerosas investigaciones relacionadas con este procedimiento de compactación y se entiende que éste será en breve el método básico de compactación en el laboratorio.

La compactación giratoria sí sería adecuada para fabricar probetas de material reciclado en el laboratorio, pero en el momento de inicio de esta investigación no se disponía del equipo, con lo que se considerará esta línea de trabajo para futuros proyectos de investigación.

Por último con el *compactador de segmento de rodillo* se puede definir cualquier procedimiento de carga para la fabricación de probetas. Este procedimiento de compactación está definido en la norma UNE-EN 12697-33: "Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 33: Elaboración de probetas con el compactador de placa". Este equipo de compactación será el utilizado en este proyecto.

La norma europea UNE-EN 12697-33 especifica los métodos de compactación de probetas en forma de paralelepípedo (placas) de mezclas bituminosas que se utilizarán para ensayar o de las que se extraerán o cortarán testigos para ser ensayados. Para una determinada masa de mezcla bituminosa, las probetas se preparan, bien someténdolas a una energía de compactación controlada, o bien hasta que se obtiene un volumen determinado y por tanto un contenido de huecos especificado.

Esta norma describe los métodos de compactación siguientes:

- Método del neumático
- Método del rodillo de acero
- Método de deslizamiento de placas

Se utilizará el método del rodillo de acero que es el equipo del que dispone el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción (LABIC) en el momento de realizar esta investigación. En concreto, el equipo es el denominado Compactador de Segmentos de Rodillo de la marca INFRA TEST. (Figura 23).



Figura 23. Compactador Segmentos de Rodillo

Este equipo realiza la compactación de las probetas aplicando una carga mediante un rodillo de acero que se desplaza paralelamente al eje de la placa. Este procedimiento es aplicable a mezclas bituminosas fabricadas en laboratorio ó en central de fabricación, para ensayarlas directamente en el ensayo en pista o bien para cortar probetas para otros ensayos, como es el caso que nos ocupa. Para la consecución de los objetivos de este trabajo, buscaremos un procedimiento de compactación de materiales reciclados en frío con emulsión bituminosa mediante energía controlada, según un plan de compactación, que comenzará con una precarga y continuará aplicando una carga progresiva que aumenta en cada pasada.

Definimos a continuación algunos términos relacionados con este equipo y que se muestran en la figura 7:

- *Pasada*: Un movimiento hacia delante o hacia atrás de la carga móvil.
- *Eje de la placa de mezcla bituminosa*: Eje de simetría de la placa de mezcla bituminosa paralelo a la dimensión mayor del molde.
- *Eje lateral*: Eje de una pasada, paralelo a la dimensión mayor del molde y situado a la distancia a del eje de la placa de mezcla bituminosa.
- *Traslación lateral*: Distancia a entre el eje de la placa de mezcla bituminosa y el eje lateral.
- *Posición trasera*: Eje lateral más separado de la cara delantera del equipo.
- *Posición central*: Eje de la placa de mezcla bituminosa.
- *Posición delantera*: Eje lateral más próximo a la cara delantera del equipo.
- *Plan de barrido*: Conjunto de modos en los que el rodillo pasa sobre la placa de mezcla bituminosa. Incluye la orden de ejecución y la amplitud de la traslación lateral.

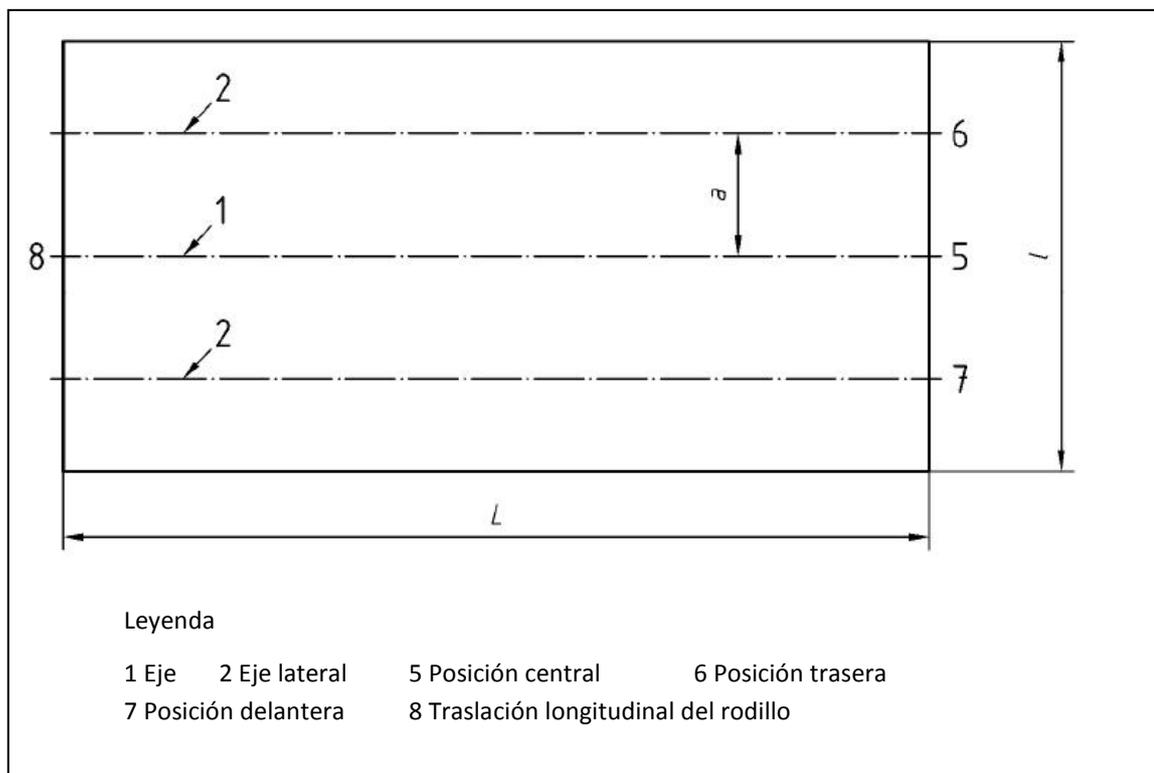


Figura 24. Plano esquemático de una placa de mezcla bituminosa.

Fuente: Norma UNE-EN 12697-33

La mezcla se vierte en el molde, precalentado a la temperatura deseada y se aplica la carga mediante un segmento de rodillo (igualmente precalentado) que se desplaza de derecha a izquierda durante el proceso de compactación pudiéndose modificar esta carga como se quiera. Como se trata de una mezcla en frío, se precalientan el molde y el rodillo a sólo 40°C, que es la máxima permitida para las emulsiones bituminosas. Este calentamiento permite trabajar la mezcla con facilidad. Este equipo se acciona mediante un servomotor controlado mediante un ordenador.

Se analizarán los posibles procedimientos de aplicación de carga con este dispositivo y se buscará una fórmula para confeccionar probetas de material reciclado con una densidad equivalente a la alcanzada en obra.

El software del equipo, permite modificar los distintos pasos en la compactación, así como las cargas aplicadas en cada paso. De esta manera se puede desarrollar un procedimiento de compactación específico para cada tipo de mezcla.

Con el material disgregado procedente de las distintas obras, se fabricará mezcla reciclada con la misma fórmula de trabajo aplicada in situ. Se verterá en el molde una masa de esta

mezcla (en función de la densidad que queramos alcanzar: densidad de referencia para cada obra) y se aplicará el procedimiento de compactación a estudiar.

Se comenzará con el procedimiento de compactación utilizado para mezclas bituminosas en caliente y, en función del resultado obtenido, se irá variando la carga y las pasadas hasta alcanzar en las probetas la densidad de referencia. Se buscará alrededor del 100% de esta densidad. Se determinará la densidad de las probetas (D_{lab}) mediante método de superficie seca saturada, tras curado en estufa a 50°C hasta peso constante. Este método es el mismo procedimiento utilizado para la determinación de la densidad de obra de referencia ($D_{obra_{ref}}$) sobre los testigos extraídos tras la ejecución del reciclado.

3.2.4. ELABORACIÓN DE PROBETAS EN EL LABORATORIO

Una vez definido el procedimiento adecuado de compactación, se fabricarán una serie de probetas paralelepípedas con el material procedente de obra mediante dicho procedimiento. El número de probetas a realizar estará condicionado por la cantidad de material que dispongamos tras la definición del procedimiento de compactación.

Se utilizará, como se ha comentado anteriormente, para cada tipo de material la fórmula de trabajo empleada en obra; así, se amasará el material fresado con las distintas proporciones de todos los componentes definidos en la misma.

La cantidad de muestra a preparar corresponderá al volumen definido por las medidas del molde multiplicadas por la densidad de obra de referencia ($D_{obra_{ref}}$) que es la que queremos reproducir. Se tamizará el material fresado por el tamiz 25, se le añadirá la cantidad de agua definida en la fórmula de trabajo, la emulsión en la proporción correspondiente y, en caso de ser necesario, cemento. A continuación se verterá la mezcla en el molde del compactador y se aplicará el procedimiento determinado en la primera fase del estudio.

Una vez que finalice el proceso de compactación, la probeta será pesada con el molde y se introducirá en la estufa a 50°C. Al día siguiente se retirará el molde y se volverá a pesar la probeta. Se mantendrá en la estufa a esa temperatura el tiempo necesario hasta registrar el mismo peso en dos días consecutivos.

Se determinará entonces la densidad de la probeta (D_{lab}) mediante procedimiento de superficie seca saturada. Esta densidad es la densidad final que alcanza el material y será igual o muy próxima a la densidad de obra de referencia ($D_{obra_{ref}}$).

Determinada la densidad de todas las probetas, se procederá a la extracción de testigos de cada una de ellas para ensayarlos y caracterizar el material reciclado obtenido mediante el procedimiento definitivo de compactación.

3.2.5. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN EN LABORATORIO

De las probetas paralelepípedas fabricadas en laboratorio se extraerán seis testigos cilíndricos de 100 milímetros de diámetro para ensayarlos y determinar el comportamiento mecánico de este material reciclado en frío con emulsión fabricado en laboratorio y comparar los resultados con los resultados obtenidos en los mismos ensayos realizados sobre testigos extraídos directamente de obra. La disposición de los testigos a extraer en cada probeta se presenta en la Figura 25.

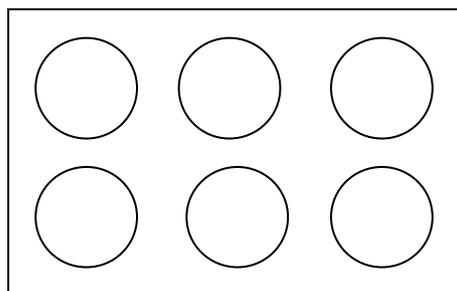


Figura 25. Disposición de los testigos en la probeta

Tras hablar con las administraciones correspondientes, se procederá a extraer el mayor número posible de testigos de las actuaciones de reciclado de las que se ha tomado material para analizar en laboratorio. Estas extracciones se realizarán cuando todos los trabajos de rehabilitación del firme hayan terminado e incluso se hayan extendido las capas bituminosas superiores al reciclado. A estos testigos se les realizarán los mismos ensayos de caracterización que se realicen sobre los testigos extraídos de las probetas paralelepípedas fabricadas en laboratorio.

El estudio del comportamiento del reciclado una vez que se ha puesto en servicio es la principal carencia que presenta la metodología del reciclado in situ en frío con emulsión. Los métodos de diseño están bastante desarrollados, como hemos podido comprobar en apartados anteriores, debido a que son estudios clásicos de laboratorio, la mayoría de los cuales se realizan con probetas construidas en el propio laboratorio. Pero en lo que se refiere a la extracción de testigos de una carretera en la que se haya implantado este procedimiento, y a su posterior análisis exhaustivo, la bibliografía presenta carencias importantes. Aunque ante el impulso de técnicas sostenibles con el medioambiente como el reciclado en frío, se están desarrollando nuevas emulsiones de curado rápido y otras prestaciones y las propiedades de los materiales reciclados, se empiezan a estudiar en profundidad, analizando el comportamiento de reciclados con distintas emulsiones tanto en laboratorio como en obra, realizando estudios con ensayos de distinta índole como el módulo dinámico o el ensayo de tracción indirecta. (Miró, 2007)

Existen multitud de ensayos para caracterizar las mezclas que constituyen las capas asfálticas convencionales de un firme. En esta investigación, algunos de ellos serán aplicados a mezclas recicladas en frío. Se escogerán aquellos sancionados por la experiencia y que sean suficientes para caracterizar el material. Se utilizarán para estudiar las características del firme reciclado en frío, tres de los ensayos que representan mejor las sollicitaciones a las que se ve sometido el firme y que se basan en el procedimiento de tracción indirecta. Éstos son:

- Módulo dinámico
- Ensayo de resistencia a tracción indirecta
- Fatiga

La resistencia a la tracción indirecta, es un parámetro que tiene relación directa con el comportamiento de la capa de un firme, ya que va a dar información sobre la cohesión en la mezcla. Sirve de base para la realización de muchos ensayos de caracterización de las mezclas bituminosas. El Módulo Dinámico nos da una idea de la rigidez de la mezcla y de la durabilidad del material, ya que al aplicar cargas cíclicas a las probetas, se origina un estado tensional similar al que tendrá en servicio.

La fisuración por fatiga es uno de los fallos más comunes en los pavimentos bituminosos. El estudio de esta característica en materiales reciclados, utilizados como capas de base ó intermedia en un paquete de firme, es de especial interés para poder realizar un correcto análisis del ciclo de vida de ese pavimento.

3.2.5.1. MÓDULO DINÁMICO

En la construcción de firmes intervienen numerosos factores como son el diseño de las mezclas bituminosas, su fabricación y su posterior compactación, que tienen una gran influencia en la calidad final de la capa ejecutada.

El dimensionamiento de un firme se entiende como aquella parte del proyecto de una carretera en la que se determinan los materiales que constituyen las distintas capas y sus espesores, de manera que alcance una vida de servicio determinada y que su coste sea mínimo.

El dimensionamiento de firmes se realiza utilizando métodos analíticos. El modelo de respuesta estructural utilizado por la mayoría de los métodos de diseño analítico es de tipo multicapa elástico lineal, basado en la solución desarrollada por Burmister. Para las mezclas bituminosas, este modelo de respuesta asume un comportamiento de tipo linealmente elástico, homogéneo y generalmente isótropo, por lo que la respuesta mecánica del material, queda definida por dos únicos parámetros: Módulo y Coeficiente de Poisson. Este segundo coeficiente es un parámetro característico de cada material que indica la relación entre las deformaciones relativas en sentido transversal que sufre el material y las

deformaciones relativas en dirección de la fuerza aplicada sobre el mismo. Para las mezclas bituminosas se considera un coeficiente de Poisson de 0,35.

El Módulo es un parámetro determinable mediante ensayos de laboratorio. Dado que los reciclados actúan como capas estructurales dentro del firme, es de vital importancia conocer su valor, ya que éste será determinante a la hora de evaluar el comportamiento de una capa reciclada. El Módulo es un parámetro que se utiliza para comprobar el estado de una capa de un firme. Nos da una idea de la calidad de la capa y de la durabilidad ya que se obtiene al aplicar cargas cíclicas a las probetas. Es un parámetro importante en los estudios de deformación permanente y fatiga, y nos da una idea de la vida útil del firme. En su valor influyen parámetros como la penetración del ligante, la forma y tamaño de los áridos o la temperatura de compactación (Del Río et al., 2011). Algunas de las conclusiones obtenidas tras la realización del proyecto SCORE, como las de Eckmann et al. (2008) proponen ensayos de rigidez mediante tracción indirecta en la metodología de mezclas recicladas en frío.

En este trabajo se va a estudiar el valor del Módulo Dinámico de las probetas fabricadas en el laboratorio mediante el procedimiento de compactación definido en la primera parte de la investigación. Es decir en probetas con un porcentaje de compactación alrededor del 100% de la densidad real de obra. De esta forma, tendremos el valor de la rigidez del material que tenemos en obra.

El módulo de rigidez se puede determinar mediante ensayos dinámicos de flexión (con 2, 3 y 4 puntos de fijación), compresión diametral (tracción indirecta) y tracción. De todos los procedimientos reseñados, se van a determinar los módulos mediante tracción indirecta, ya que permite el empleo de probetas y testigos de poco espesor (entre 30 mm y 75 mm). La norma UNE-EN 12697-26, en el Anexo C, recoge el procedimiento a seguir para realizar este ensayo, en el que se caracteriza la rigidez de mezclas bituminosas mediante el ensayo de tracción indirecta aplicado a probetas compactadas bajo la acción de una carga sinusoidal. Este método será el que se utilice para la determinación de módulos dinámicos en este trabajo de investigación y se realizará a una temperatura de 20°C, ya que las obras de estudio están situadas en zonas térmicas cálidas y la temperatura media anual oscilará alrededor de ese valor. El módulo de rigidez a menor temperatura será algo más elevado.

Se utilizará un actuador que pueda aplicar una carga a lo largo del diámetro vertical de la probeta a través de las pletinas de carga. La carga tendrá forma de medio seno, y se aplicarán impulsos de carga repetidos que se alternarán con períodos de descanso, como se indica en la Figura 26.

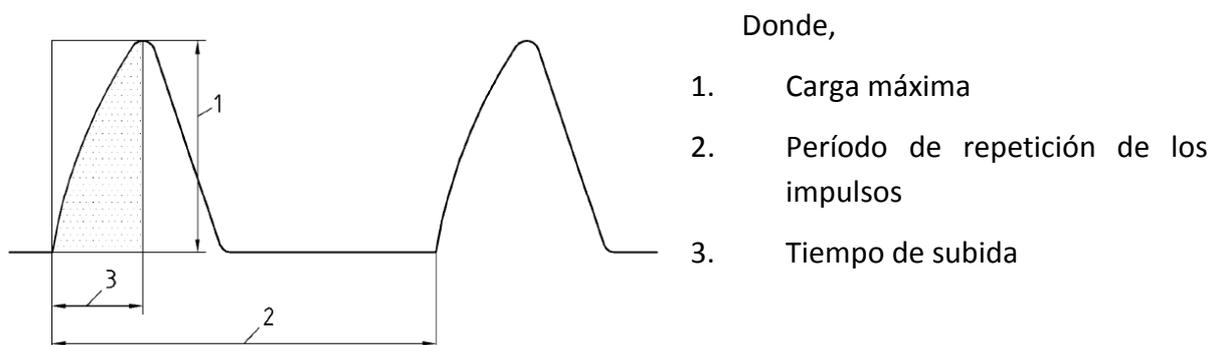


Figura 26. Forma del impulso de carga. Fuente: Norma UNE-EN 12697:26

Se aplicarán 10 impulsos de acondicionamiento para permitir que el equipo se ajuste a la magnitud de la carga y a su duración, para obtener la deformación horizontal diametral y el tiempo de carga especificados. Se aplicarán otros 5 impulsos más para determinar el factor de superficie de carga, y por último, se aplicarán los 5 impulsos definitivos con los que se calculará en módulo de rigidez mediante la siguiente fórmula:

$$S_m = \frac{F \times (\nu + 0.27)}{(z \times h)}$$

Donde,

S_m : Módulo de rigidez medido, expresado en Megapascales (MPa)

F : Valor máximo de la carga aplicada, expresado en Newtons (N)

z : Amplitud de la deformación horizontal obtenida durante el ciclo de carga, medida en milímetros (mm)

h : Espesor medio de la probeta, medido en milímetros (mm)

ν : Coeficiente de Poisson

Este ensayo se realizará en una prensa dinámica de marca IBERTEST modelo UFIB-100-DW.

La obtención del módulo se realiza mediante un ensayo no destructivo, por lo que un mismo espécimen utilizado para determinar el módulo podría ser ensayado de nuevo para la determinación de otro parámetro distinto. No obstante, al someter las probetas a unas tensiones cíclicas se pueden producir pequeñas deformaciones en éstas. Se analizará si este estado tensional influye en la resistencia a la tracción indirecta. Para ello, se tomarán seis testigos de una misma placa y se romperán a tracción indirecta. En tres de ellos previamente, se realizará la determinación del módulo dinámico a 20°C y se compararán los resultados para verificar que el módulo no afecta a la resistencia de la probeta.

3.2.5.2. ENSAYO DE RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA

El ensayo de Resistencia a Tracción Indirecta arroja información muy valiosa para la caracterización de un firme. El método de ensayo permite, por una parte, definir un parámetro capaz de caracterizar la mezcla bituminosa y, por otra, medir, en función del contenido de ligante, la cohesión de la mezcla.

La principal ventaja del método es su sencillez. Este factor permite caracterizar de una forma rápida, fiable y económica las mezclas bituminosas. Ya en los años setenta se ponía de manifiesto las ventajas de este ensayo, como se recogía en un estudio de la Universidad de Austin, en el Estado de Texas, (Kennedy, 1977) que señalaba como principales ventajas de este ensayo las siguientes:

- Es un ensayo relativamente sencillo.
- El tipo de muestra y el equipo son los mismos que los utilizados para otro tipo de ensayos.
- La rotura no se ve afectada por las condiciones de la superficie de la probeta.
- La rotura se inicia en una región relativamente uniforme de tensiones de tracción.
- El coeficiente de variación de los resultados del ensayo es relativamente bajo comparado con otros métodos. Tesoriere (Tesoriere, 1990) en sus estudios habló de dispersiones inferiores al 10% en comparación con el de Marshall que pueden ser del 15-20%.
- El ensayo puede utilizarse bajo carga estática o dinámica, modificando la prensa en función del tipo de estudio que se realice.

El ensayo de tracción indirecta no sólo da información de la resistencia a tracción indirecta, sino que se utiliza como base para la realización de otros ensayos que nos dan información sobre propiedades elásticas resilientes (módulo de elasticidad estático o dinámico en función del tipo de carga aplicada), fisuración térmica, fisuración por fatiga, deformación permanente y puede utilizarse para evaluar el efecto de la humedad en mezclas bituminosas (ensayo de sensibilidad al agua).

La determinación de la resistencia a tracción indirecta se va a realizar mediante el ensayo recogido en la UNE-EN 12697-23. El principio del método para la determinación de la resistencia a tracción indirecta consiste en imponer una deformación por compresión diametral a una probeta cilíndrica situada horizontalmente entre los platos de una prensa, de forma que los esfuerzos aplicados al testigo sean sobre dos generatrices opuestas. Para poder cargar la probeta a compresión en un plano diametral vertical, se requiere un dispositivo de sujeción de la probeta a través del cual se materialice dicho plano de carga. Este dispositivo, se presenta en la Figura 27. La parte superior del bastidor de ensayo debe

estar guiada para asegurar un desplazamiento paralelo de las bandas de carga. Como parte de este dispositivo y en contacto directo con dos generatrices diametralmente opuestas de la probeta, se colocan dos bandas de carga para evitar la rotura local de la probeta.

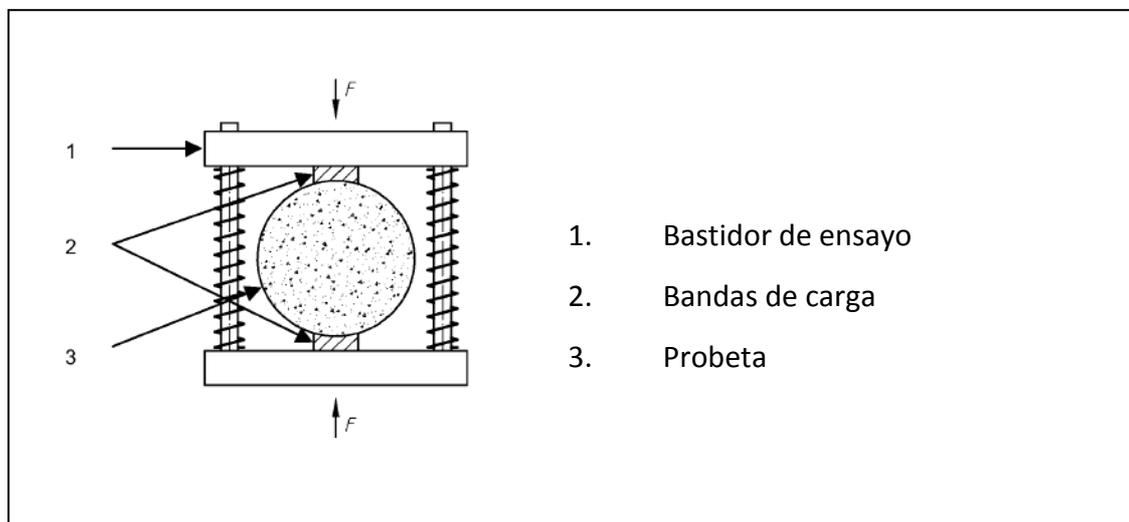


Figura 27. Dispositivo para ensayo Tracción Indirecta

Fuente: Norma UNE-EN 12697:23

Esta configuración de carga provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, y esta tracción es la que agota la probeta y hace que rompa en el plano diametral. La resistencia a la tracción indirecta es el esfuerzo de tracción máximo calculado en función de la carga máxima aplicada cuando se produce la rotura de la probeta y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$RTI = \frac{2 * P}{\pi * d * h}$$

Donde,

RTI: Resistencia a la tracción indirecta (MPa)

P: Carga máxima aplicada (N)

h: altura de la probeta (mm)

d: Diámetro de la probeta (mm)

El desarrollo de las tensiones dentro de una muestra cilíndrica sometida a una carga lineal fue estudiado por Thomas W. Kennedy y W. Ronald Hudson en 1968 (Kennedy, 1968). La distribución teórica de tensiones a lo largo de los ejes horizontal y vertical para una carga concentrada se muestra en la Figura 28.

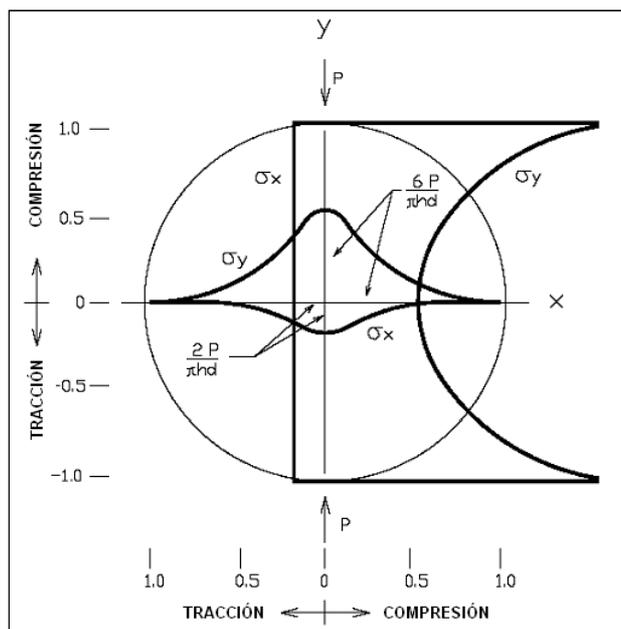


Figura 28. Distribución de tensiones teóricas sobre los planos diametrales horizontal y vertical para el ensayo de tracción indirecta. Fuente: Kennedy, 1968

El estado de tensiones en el plano diametral horizontal está dado por las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_x = \frac{2 * P}{\pi * d * h} \left[\frac{d^2 - 4 * x^2}{d^2 + 4 * x^2} \right]$$

$$\sigma_y = \frac{2 * P}{\pi * d * h} \left[\frac{4 * d^2}{(d^2 + 4 * x^2)} - 1 \right]$$

$$\tau_{xy} = 0$$

Para el plano diametral vertical, a lo largo del eje de carga, las tensiones están dadas por las ecuaciones:

$$\sigma_x = \frac{2 * P}{\pi * d * h}$$

$$\sigma_y = \frac{2 * P}{\pi * h} \left[\frac{2}{d - 2 * y} + \frac{2}{d - 2 * y} - \frac{1}{d} \right]$$

$$\tau_{xy} = 0$$

Donde,

P = carga total aplicada (N)

h = espesor de la probeta (mm)

d = diámetro de la probeta (mm)

x,y = valores de las coordenadas desde el centro de la probeta

El equipo a emplear para la realización de estos ensayos puede ser una prensa de compresión mecánica o hidráulica, que pueda proporcionar durante la aplicación de la carga una velocidad uniforme de desplazamiento del sistema de carga de 50 ± 2 mm / min. En este trabajo se utilizará una prensa multiensayo de 100 kN de capacidad de la marca IBERTEST.

El ensayo de sensibilidad al agua, recogido en la norma UNE-EN 12697-12 “Determinación de la sensibilidad al agua de probetas de mezclas bituminosas”, se basa en el ensayo de tracción indirecta para medir la susceptibilidad de una mezcla bituminosa a la acción del agua. Compara el valor de la resistencia de un grupo de probetas acondicionadas al aire con el valor de la resistencia obtenida en un segundo grupo de probetas acondicionadas en agua. Este ensayo sustituye al de Inmersión-Compresión desde la entrada en vigor el 1 de marzo del año 2008 del mercado CE de mezclas bituminosas, como se ha dicho en apartados anteriores.

La norma NLT-162 “Efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas bituminosas compactadas (Ensayo de Inmersión – compresión)” describe el procedimiento que debe seguirse para determinar la pérdida de cohesión que se produce por la acción del agua sobre las mezclas bituminosas compactadas. En este ensayo se obtiene un índice numérico al comparar las resistencias a compresión simple obtenidas entre probetas mantenidas al aire y probetas duplicadas sometidas a la acción del agua bajo unas condiciones definidas en esta norma. Este es el ensayo, como hemos visto en epígrafes anteriores en el que se basa el diseño de las mezclas recicladas in situ en frío con emulsión. En esta investigación se va a analizar la susceptibilidad al agua de probetas de reciclado en frío en base al en el ensayo de sensibilidad al agua, mediante rotura de las probetas a tracción indirecta, tras el acondicionamiento de las mismas en húmedo y en seco.

Una vez que se tenga un conjunto de seis (6) testigos extraídos de una de las probetas paralelepípedas, se dividirá en dos subconjuntos del mismo número de probetas

equivalentes que se acondicionarán de la misma manera. Un subconjunto se mantendrá en seco al aire a 20°C, mientras el otro, se satura y se mantiene sumergido en un baño de agua a 40°C de temperatura durante 72 horas. Después de este acondicionamiento, se pondrán las probetas a temperatura de ensayo en cámara de aire con termostato controlado las probetas secas, y mediante inmersión en baño de agua a temperatura de ensayo las probetas húmedas. Se determinará la resistencia a la tracción indirecta de ambos subconjuntos de acuerdo con lo establecido en la norma UNE-EN 12697-23 a una temperatura de 15°C. A continuación, se determinará la razón entre la resistencia a tracción indirecta del subconjunto acondicionado en agua y la resistencia a la tracción indirecta del subconjunto acondicionado en seco, y se expresará como un porcentaje.

3.2.5.3. FATIGA MEDIANTE TRACCIÓN INDIRECTA

En este trabajo, se determinará la fatiga del material reciclado en frío mediante el ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas, recogido en la norma UNE-EN 12697-24, Anexo E. De esta forma se caracteriza el comportamiento de las mezclas bituminosas cuando se someten a una carga repetida, con un modo de carga constante. Las probetas se expondrán a cargas de compresión repetidas con una señal de carga de medio senoverso a través del plano diametral vertical. Esta aplicación de carga desarrollará un esfuerzo de tracción relativamente uniforme perpendicular a la dirección de la carga aplicada y a lo largo del plano diametral vertical que hará que la probeta falle por rotura a lo largo de la parte central del diámetro vertical. Se medirá la deformación horizontal resultante de la probeta, y se utilizará una relación de Poisson asumida para calcular la deformación por tracción en el centro de la probeta. La vida hasta la rotura se debe determinar como el número total de aplicaciones de carga realizadas antes que se produzca la rotura de la probeta.

El método europeo de ensayo UNE-EN 12697-24 establece varios procedimientos de ensayo de fatiga. El procedimiento de ensayo a flexión con 3 puntos de fijación (Anejo C) de la norma europea es idéntico a la antigua Norma NLT-350. Sin embargo, en la Norma UNE-EN 13108-20 sólo se admite el empleo de los procedimientos a flexión con 2 y 4 puntos de fijación, por lo que en



Figura 29. Probetas paralelepípedas defectuosas

España el ensayo de fatiga se realiza mediante el ensayo UNE-EN12697-24, Anexo A y Anexo D. No obstante, en esta investigación se va a realizar mediante el ensayo de tracción indirecta, recogido en el Anexo E. Con este ensayo, la cantidad de material que se necesita es menor, y las probetas cilíndricas, no se desmoronarán tanto como las paralelepípedas,

que en trabajos previos se intentaron hacer y al cortarlas se deterioraban mucho por los bordes, como puede apreciarse en la Figura 29. La altura necesaria de las probetas para la realización de este ensayo es 40 mm, valor no excesivamente alto y que se podrá conseguir aún en caso de tener que recortar los testigos.

En este apartado, se tratará de dar una aplicabilidad a los resultados de fatiga obtenidos en nuestros ensayos. Para ello, y usando el programa de cálculo de deformaciones en firmes denominado ECOROUTE, se establecerá una comparativa de resultados entre el análisis establecido en este estudio y otro paralelo de carácter más teórico.

Se calcularán las deformaciones en la fibra inferior de la capa de reciclado con el mencionado programa. Los parámetros necesarios para el cálculo son el espesor de las capas, dato conocido y los módulos, que para el caso del material reciclado se utilizará el módulo determinado en laboratorio. A partir de estas deformaciones se podrá hallar el número de ciclos que necesita el material para llegar a rotura, despejándolo de la expresión definida para la ley de fatiga. Se podrá verificar si coincide con la categoría de tráfico para la que está diseñada el firme.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. DETERMINACIÓN DEL CASO CONCRETO DE ESTUDIO

De las obras en ejecución se pudieron tomar en distintos momentos las siguientes cantidades de material:

- De la A-7204 Málaga, 40 kilogramos de material fresado
- De la A-351 Écija-Osuna, 150 kilogramos de material fresado
- De la A-472 Huelva, 410 kilogramos de material fresado
- De la Rehabilitación de la Avenida de Kansas City, 130 kilogramos

Es decir, se tomaron en total 730 kilogramos de material fresado de distintas obras de reciclado in situ en frío con emulsión bituminosa para estudiar un procedimiento de compactación en laboratorio para este material y para realizar su posterior caracterización mecánica.

Las muestras recibidas, se identificaron mediante su granulometría, realizada según la norma UNE-EN 933-1 (AENOR, 1998) y se determinó el contenido de ligante sobre árido mediante la norma NLT- 164 (CEDEX, 1990). Las granulometrías de las obras de referencia se presentan en la Figura 1. Todas presentan curvas continuas y cumplen con un porcentaje de material que pasa por el tamiz 25 mm comprendido entre el 90 y el 100%, lo que indica que la velocidad de avance de la máquina recicladora y la velocidad de rotación del tambor fresador han sido las adecuadas para proporcionar una adecuada granulometría al material fresado (Froumentin, 2008). Las curvas encajan en el huso de reciclado RE 1, que es uno de los husos prescritos en el artículo 20 del Pliego de Prescripciones Técnicas generales para Obras de Conservación de Carreteras, PG 4 (Ministerio de Fomento, 2002) en España.

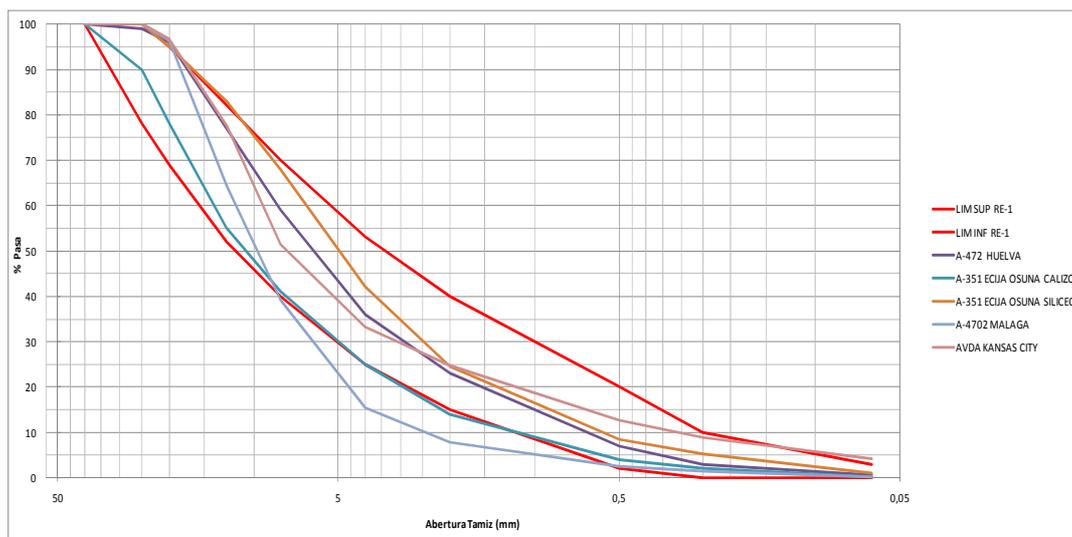


Figura 30. Granulometría del material reciclado

Los contenidos de ligante obtenidos en el material reciclado, se recogen en la Tabla 5.

OBRA	% Ligante s/a (NLT-164)
AVDA. KANSAS CITY	4,0
A-472 HUELVA	4,9
A-351 ÉCIJA-OSUNA SILICEO	4,4
A-351 ÉCIJA-OSUNA SILICEO	4,5
A-7204 MÁLAGA	4,7

Tabla 5. Contenidos ligante material fresado

4.2. DENSIDAD DE OBRA DE REFERENCIA. NUEVO MÉTODO EN OBRA

Se ha realizado un control de densidades in situ en las obras de reciclado in situ en frío con emulsión bituminosa de Sevilla y de Huelva, utilizando los distintos métodos posibles descritos en el apartado correspondiente de la metodología (equipo nuclear y equipo no nuclear PQI). Se ha intentado determinar si los resultados obtenidos mediante el equipo no nuclear son fiables o no, pero se han encontrado deficiencias en la medida de la densidad, ya que el contenido de humedad que determina el equipo PQI no corresponde con el realmente medido y el valor de la densidad, a pesar del factor de corrección aplicado tampoco es exacto. Por lo que la medida de densidad de obra de referencia ($Dobra_{ref}$) que se ha utilizado en el laboratorio para reproducir el material, ha sido la determinada en los testigos de obra extraídos cuando la mezcla ha perdido toda la humedad.

Enmarcado en el proyecto de investigación: “Utilización de mezclas bituminosas templadas con emulsión en firmes de carreteras” (Proyecto de Investigación Nº GGI-1029/IDI0 ,2010) se ha desarrollado un control de densidades más exhaustivo que el planteado en las obras de reciclado, de una mezcla bituminosa templada, con la finalidad de verificar el uso del equipo PQI en este tipo de materiales. Se han tomado medidas de densidad mediante los tres procedimientos existentes; densidad de testigos en laboratorio (UNE-EN 12697-5), densidad in-situ utilizando equipo nuclear (Troxler 3440) y densidad in situ con equipo no nuclear (PQI 301).

Las mezclas templadas son mezclas fabricadas con emulsión, a temperaturas siempre por debajo de los 100°C. Con estas características, el material es similar a los reciclados in situ en frío al menos en lo que se refiere a la estabilización de la densidad con el paso del tiempo y la pérdida de humedad.

Se estudia en este trabajo la idoneidad del equipo PQI para la determinación inmediata de la densidad in situ de mezclas bituminosas fabricadas con emulsión. La investigación se ha realizado en tres etapas:

1. Se ha estudiado la relación densidad/humedad y densidad/temperatura a partir de las mediciones realizadas con el PQI
2. Se ha analizado cómo varía la densidad con la pérdida de humedad del material fabricado con emulsión
3. Se ha realizado una comparación entre las densidades in situ obtenidas con el equipo nuclear, PQI y medida de densidades de testigos en laboratorio.

Se ha dividido la carretera objeto de estudio en 7 tramos en función de su fecha de ejecución. En cada tramo se midió la densidad con el PQI en sucesivos hitos temporales, comprobando la pérdida de humedad con el paso del tiempo. Estas mediciones se realizaron desde su extensión hasta el momento en que fue posible la extracción de testigos del pavimento sin que se produjera la desintegración de la muestra. En la Tabla 6 se muestran el número total de mediciones de PQI de cada tramo estudiado.

TRAMO	LONG. TOTAL (m)	Nº MED. PQI
T1	550	61
T2	1000	64
T3	1000	33
T4	1200	33
T5	1400	45
T6	1200	40
T7	1300	33

Tabla 6. Medidas realizadas con PQI

Estas mediciones sirvieron de punto de partida para los trabajos a desarrollar en esta parte de la investigación. En los siguientes subepígrafes se resumen los resultados obtenidos en esta parte de la investigación relativa a la determinación de un nuevo método de medida de densidad in situ que se ha desglosado en tres etapas (Martínez-Echevarría et al., 2012): primero se ha buscado una relación entre los valores obtenidos con el equipo no nuclear, PQI, y los valores de humedad y temperatura proporcionados por el mismo; en segundo lugar se ha estudiado en laboratorio la variación de la densidad medida con el PQI, con la pérdida de humedad y por último se han analizado los valores obtenidos en obra al realizar las mediciones con los tres métodos de estudio.

4.2.1. Relación entre los valores de densidad obtenidos con PQI y las variables humedad y temperatura proporcionadas por el equipo.

En el primer tramo de la obra de referencia, se tomaron 61 mediciones con el equipo PQI durante dos meses seguidos, registrando las medidas de densidad, humedad y temperatura. Se analizaron cómo variaban estas medidas con el paso del tiempo y se estudió la relación entre las tres variables.

En las figuras 1 y 2 aparecen correlaciones entre la densidad y la humedad y temperatura registrados por el equipo. Para evaluar esta relación se recurrió a una regresión lineal simple, en la que la variable dependiente siempre es la densidad, y, la variable independiente es en el primer caso la humedad y en el segundo la temperatura. Se puede apreciar que la densidad tiene una mayor dependencia con la variable humedad que con la temperatura.

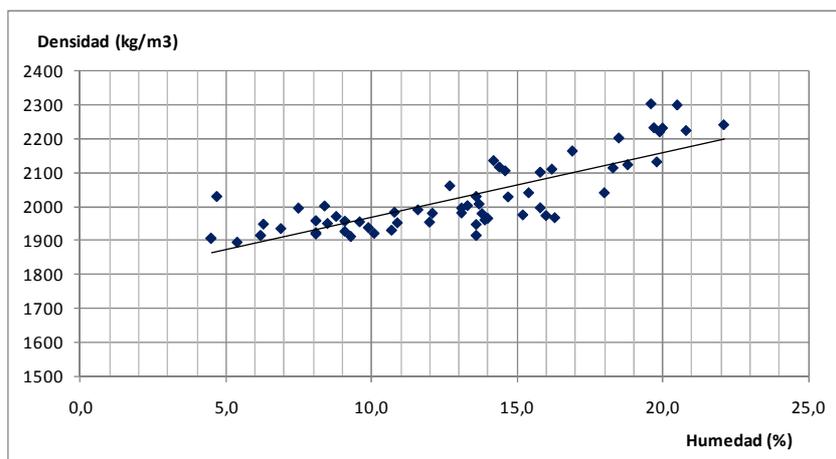


Figura 31. Correlación entre densidad y humedad

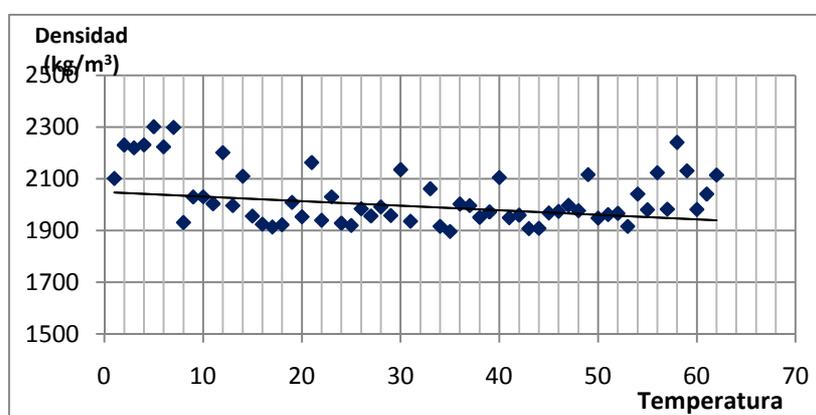


Figura 32. Correlación entre densidad y temperatura

➤ **Correlación entre densidad y humedad**

Para estudiar la correlación entre la densidad y la humedad, se recurrió a una regresión lineal simple, en la que la variable dependiente es la densidad y la variable independiente la humedad. Se ha utilizado un programa estadístico denominado Statistical Product and Service Solutions (SPSS) ó Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) para determinar los coeficientes de esta regresión. Los datos obtenidos en este programa se presentan en la Tabla 7.

RESUMEN DEL MODELO						
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación		
1	0,813(a)	0,660	0,655	63,31292		

a Variables predictoras: (Constante), humedad

ANOVA (b)						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	459964,637	1	459964,637	114,747	0,000(a)
	Residual	236503,035	59	4008,526		
	Total	696467,672	60			

a Variables predictoras: (Constante), humedad

b Variable dependiente: Densidad

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta	B	Error típ.
1	(Constante)	1780,843	24,292		73,308	0,000
	VAR00003	18,915	1,766	0,813	10,712	0,000

a Variable dependiente: Densidad

Tabla 7. Resultados SPSS relación densidad/humedad

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación entre Densidad y humedad, cuya ecuación del modelo ajustado es:

$$Densidad = 1780,843 + 18,915 * humedad$$

Como el valor-P (0,000) en la tabla ANOVA es menor de 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre Densidad y Humedad con un nivel de confianza del 95%. El estadístico R-Cuadrado indica que el modelo ajustado explica el 66,0% de la variabilidad en Densidad. El coeficiente de correlación es igual a 0,813, indicando una relación fuerte entre las variables.

➤ **Correlación entre densidad y temperatura**

Para estudiar la relación entre la densidad y la temperatura, recurrimos al mismo estudio, obteniendo en este caso los siguientes resultados en el estudio estadístico, Tabla 8.

RESUMEN DEL MODELO

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	0,061(a)	0,004	-0,013	108,44666

a Variables predictoras: (Constante), temperatura

ANOVA (b)

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	2587,697	1	2587,697	0,220	0,641(a)
	Residual	693879,975	59	11760,678		
	Total	696467,672	60			

a Variables predictoras: (Constante), temperatura

b Variable dependiente: Densidad

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		t		Sig.
		B	Error típ.	Beta	B	Error típ.		
1	(Constante)	2000,710	55,979			35,740		0,000
	VAR00002	0,679	1,448	0,061		0,469		0,641

a Variable dependiente: Densidad

Tabla 8. Resultados SPSS relación densidad/temperatura

La ecuación que describe esta relación, utilizando un modelo lineal es de la siguiente forma:

$$Densidad = 2000,71 + 0,679 * temperatura$$

Como el valor-P (0,641) en la tabla ANOVA es mayor de 0,05, no existe una relación estadísticamente significativa entre densidad y temperatura, lo que se puede asegurar con un nivel de confianza del 95%. El valor obtenido en el estadístico R-Cuadrado ($R^2=0,004$), indica que el modelo ajustado no explica la variabilidad en Densidad. El valor obtenido para el coeficiente de correlación, de 0,061, indica también que no existe relación entre las variables densidad y temperatura.

4.2.2. Variación de la densidad obtenida en laboratorio provocada por la variación del contenido de humedad de la mezcla

Analizando la evolución a lo largo del tiempo de los valores de densidad tomados en los distintos tramos, se observa que las medidas de densidad disminuyen, al igual que disminuye el valor de la humedad registrada por el equipo PQI. En esta segunda fase de la investigación, se estudia esta situación en laboratorio y se analiza cómo varía la medida de la densidad con el PQI al ir variando el contenido de humedad en la muestra de laboratorio.

Una vez que la mezcla estabiliza su valor de densidad, se extraen muestras procedentes de tres lugares diferentes de la obra. Las muestras se toman cortando de la capa de rodadura probetas paralelepípedas en seco mediante utilización de cortadora (radial). Una vez en laboratorio, se sumergieron durante 24 horas con el objetivo de saturarlas y a continuación se sometieron a un proceso de reducción de la humedad mediante secado en estufa, registrándose este efecto mediante pesadas sucesivas de las muestras, además de medir la densidad y humedad con el equipo PQI, de esta manera se pudo analizar la variación de los valores de densidad medidos con el PQI al disminuir la humedad de la muestra.

La Figura 33 representa la densidad medida con el dispositivo PQI en cada momento. Se aprecia como la densidad se reduce a medida que aumenta el tiempo en estufa, es decir, a medida que se reduce su contenido de humedad.

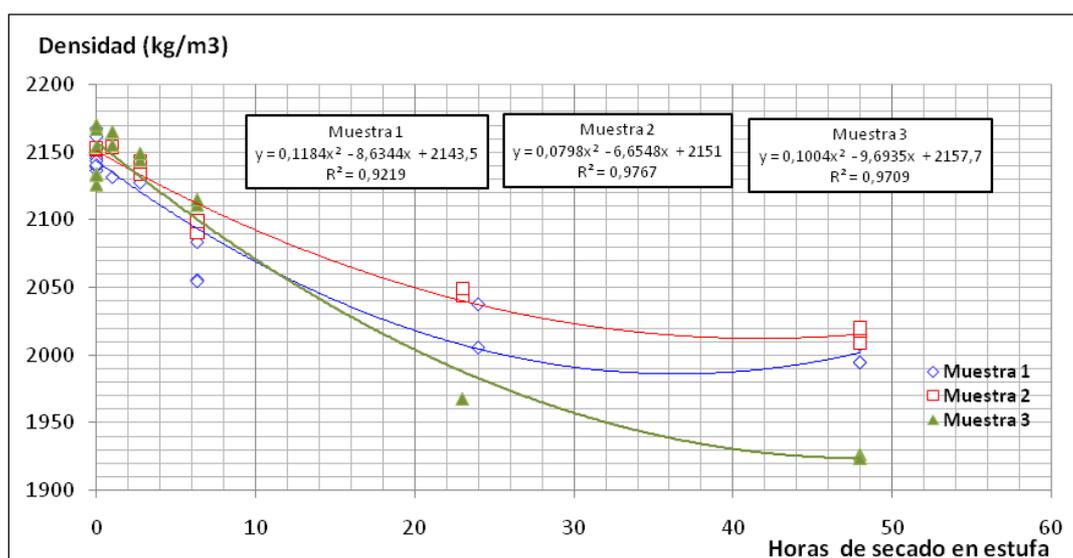


Figura 33. Variación de la densidad medida con el PQI en muestras secadas en estufa en laboratorio

En la Figura 34 se ha representado, para la muestra 1, la densidad respecto al contenido de humedad, obtenida por diferencias de peso, y se observa una buena dependencia. Se aprecia claramente cómo disminuye la densidad al disminuir la humedad en la mezcla.

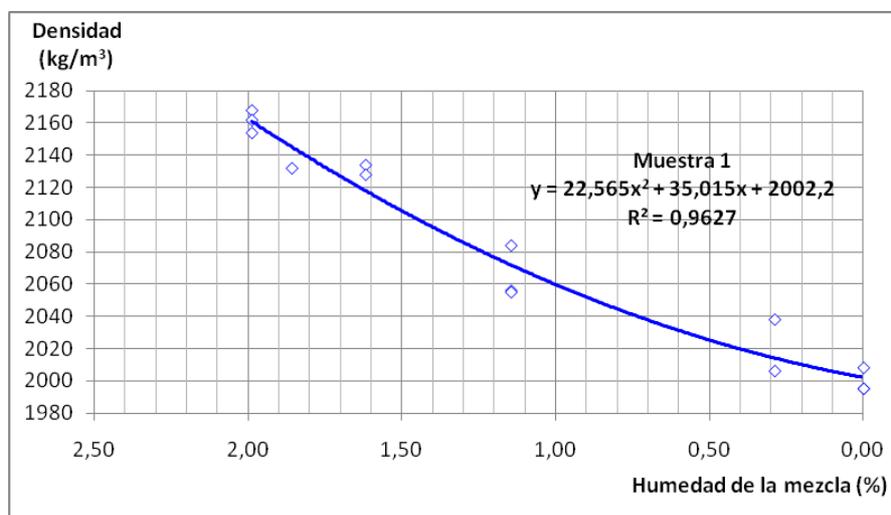


Figura 34. Variación de la densidad con el contenido de humedad en la mezcla

Durante la prueba se observó que los valores de humedad que proporciona el equipo son mucho más elevados que los porcentajes reales de humedad en la mezcla; sin embargo, tal y como se puede comprobar en la Figura 35, existe una relación entre ambos, por tanto los valores ofrecidos por el equipo están influenciados por la humedad interna de la mezcla.

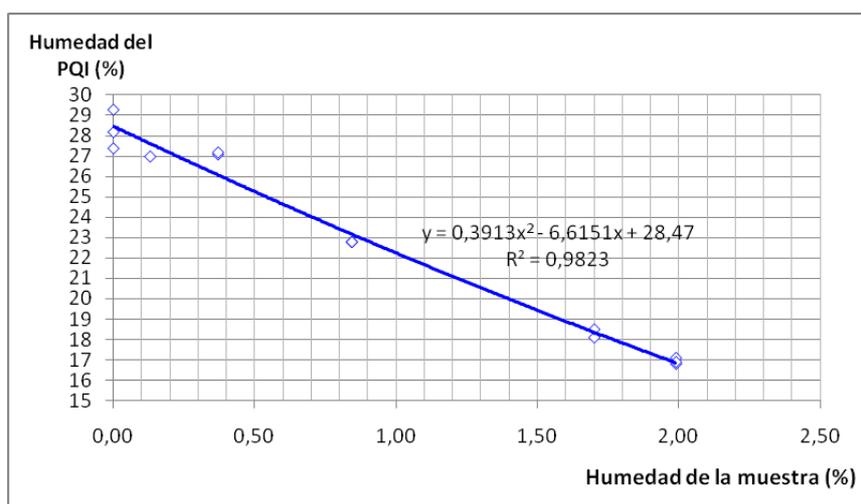


Figura 35. Relación entre la humedad medida por el equipo y el porcentaje real de humedad

En relación con estos resultados, se deduce que la densidad medida con el PQI decrece cuando la muestra va perdiendo humedad, ya que no existe ningún proceso de compactación que densifique la muestra al perder el agua.

El equipo PQI es capaz de registrar los cambios que se producen en las densidades, como consecuencia de las variaciones en la humedad. Cuando, debido a la inmersión, se provoca una variación importante de la humedad, el equipo es capaz de registrarlo, pero seguirán produciéndose cambios hasta que haya encontrado un valor estable de humedad en la superficie de la mezcla.

4.2.3. Comparación entre las densidades in situ obtenidas con el equipo nuclear, PQI y medida de densidades de testigos en laboratorio

Por último se analizan las diferencias obtenidas en las medidas de densidades con los tres métodos de estudio. Estas medidas, se efectúan en el momento en el que se pudieron extraer los testigos del pavimento, es decir cuando la mezcla perdió toda su humedad. En la Tabla 9 se indica el número de mediciones realizadas en los distintos tramos de la obra y sobre las que se ha desarrollado esta parte del estudio.

TRAMO	Nº MEDICIONES PQI	Nº MEDICIONES NUCLEAR	Nº TESTIGOS EXTRAÍDOS
T1	18	18	18
T2	20	20	20
T3	12	12	12
T4	13	13	13
T5	10	10	10
T6	15	15	15
T7	26	26	26
TOTAL	114	114	114

Tabla 9. Número de medidas de densidad por los tres procedimientos

Se comprueba que la distribución de frecuencias, en lo que se refiere a las densidades, se ajusta a una distribución normal en los tres casos para poder comparar los resultados obtenidos.

En cada uno de los tramos de estudio de la obra, se han analizado las medias de densidad y el intervalo de confianza para una probabilidad del 95%. Se ha observado que la distribución de frecuencias, se ajusta bastante bien a una ley normal en los tres casos, como se presenta gráficamente en las figuras 37, 38 y 39.

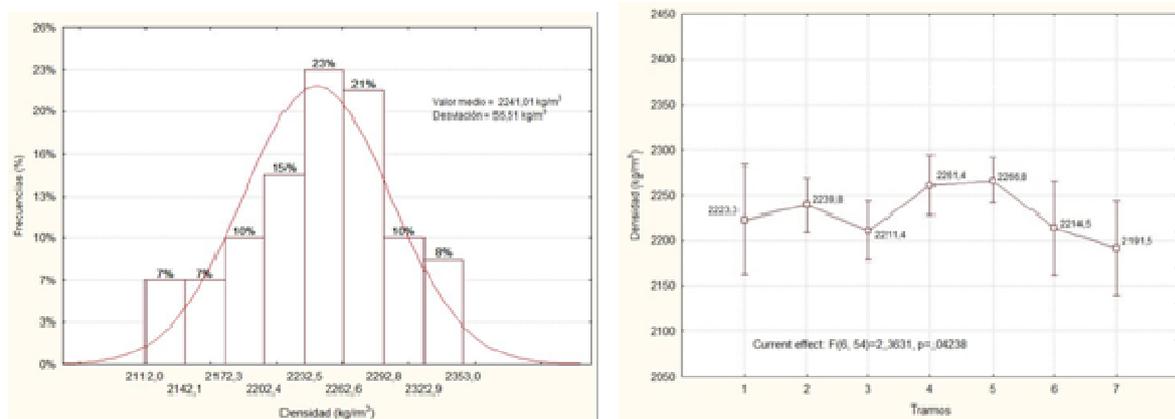


Figura 36. Distribución de frecuencias y valores medios de densidades de testigos por tramos

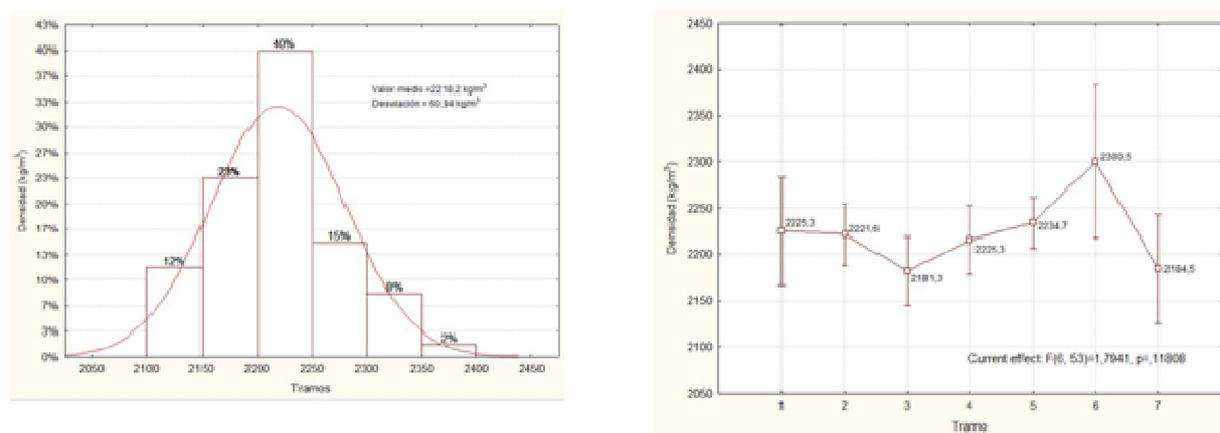


Figura 37. Distribución de frecuencias y valores medios de densidades medidas con nuclear por tramos

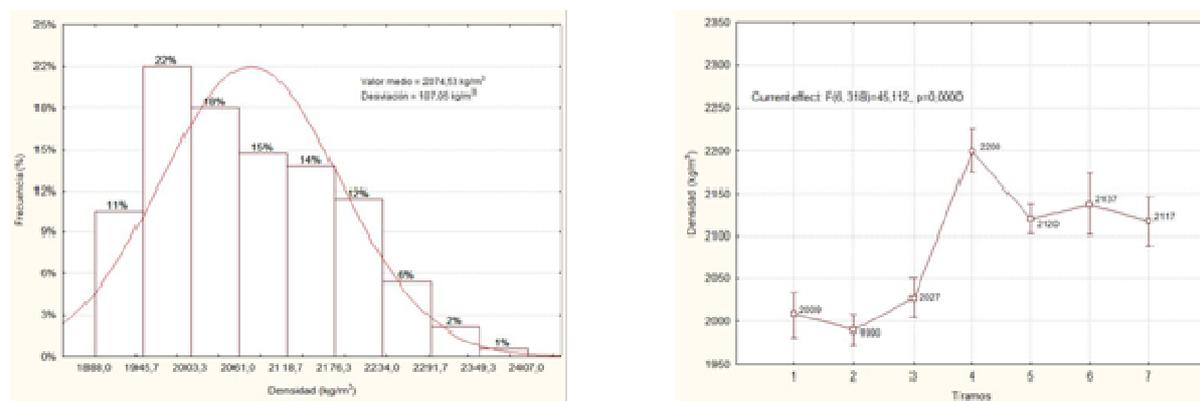


Figura 38. Distribución de frecuencias y valores medios de densidades medidas con PQI por tramos

Para todas las variables nos encontramos ante una ley de distribución normal y con unos intervalos de confianza para una probabilidad del 95% similares, lo que permite comparar los valores medios de densidades por los tres métodos de medida objeto de estudio. Se observa, si se analizan las medidas de densidad por tramos, que las medidas determinadas con el equipo nuclear son ligeramente inferiores a las obtenidas sobre testigos en laboratorio, mientras que las determinadas con el equipo PQI son más bajas respecto a los otros dos métodos.

4.2.4. Consideraciones finales

A partir de los resultados obtenidos con este trabajo se puede decir que el dispositivo PQI puede ser utilizado, en mezclas templadas con emulsiones, con el propósito de comprobar el grado de maduración y realizar el seguimiento de la evolución de las mezclas, pero no existe suficiente información para recomendarlo como una herramienta fiable para el control de calidad y determinación de la densidad. Las mediciones de densidad in situ, deben hacerse de forma continuada en el tiempo para controlar la pérdida de humedad, hasta el momento en que se puedan extraer testigos.

Se ha comprobado que la influencia que tiene la humedad en la medida de la densidad con el PQI es muy elevada. El valor que el equipo refleja del contenido de humedad en la muestra no es real, aunque para los datos de este estudio existe una correlación directa entre la humedad real y la humedad medida por el PQI. La temperatura, sin embargo no es un factor que afecte a la medida de la densidad.

El equipo PQI muestra ventajas en la determinación de las densidades in situ que lo hacen más adecuado que los equipos de densidad nucleares, por lo cual sería conveniente un estudio más profundo para poder determinar factores de corrección en los valores de humedad, de manera que pueda ser utilizado para el control de la mezcla fabricada con emulsión, con la misma confianza con la que se puede emplear en mezclas en caliente para control de calidad.

La determinación, por tanto, en las obras de reciclado de la densidad de obra referencia ($D_{obra_{ref}}$), será la determinada en laboratorio sobre testigos extraídos del pavimento mediante sonda rotativa, una vez que el material haya perdido toda su humedad.

4.3. PROCEDIMIENTO DE COMPACTACIÓN EN LABORATORIO

Determinada la densidad de obra que hay que alcanzar en laboratorio se procede a estudiar un procedimiento de compactación adecuado para reproducir mezclas recicladas en frío con emulsión bituminosa de las mismas características que la extendida en obra.

El equipo que se ha utilizado para estudiar un procedimiento de compactación para las mezclas recicladas es el compactador de segmentos de rodillo. Este equipo permite programar los pasos/etapas de compactación, definiendo los distintos pasos a seguir y la carga aplicada en cada uno de ellos.

En la Figura 39 se muestra la pantalla de programación del software instalado en el equipo.

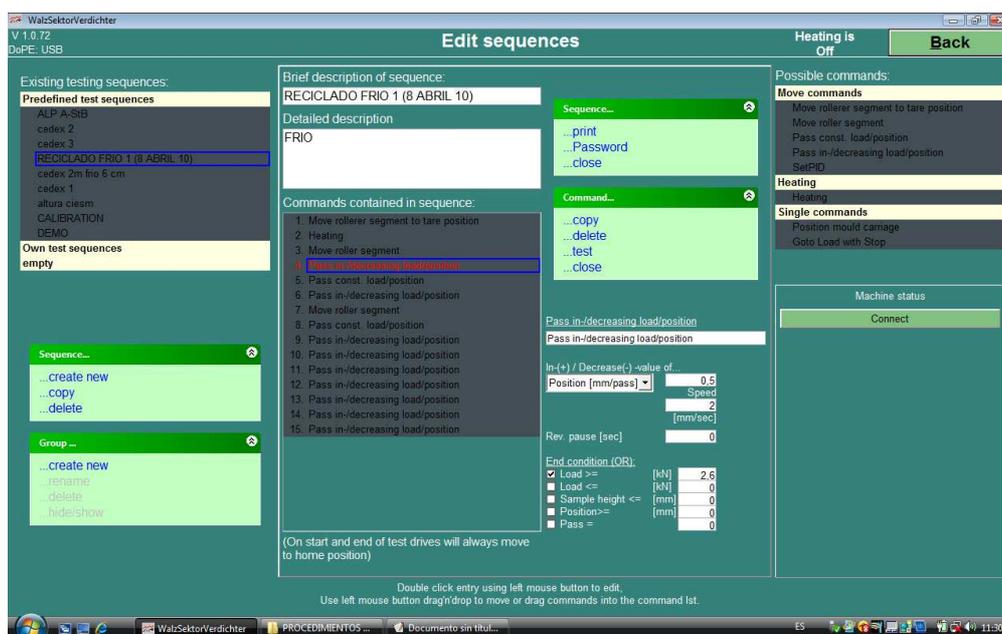


Figura 39. Pantalla de programación del software del Compactador de Segmentos de Rodillo.
Fuente: Software del equipo, WalzSektVerd

En la parte central aparece la secuencia de comandos definidos para cada procedimiento, a la derecha se muestran desglosadas las condiciones de cada secuencia. Tanto las propias secuencias como las condiciones de las mismas pueden ser modificadas por el usuario.

Como se ha descrito en el apartado anterior, se busca un procedimiento de compactación que permita reproducir en laboratorio el material reciclado puesto en obra. Se partió de un determinado procedimiento, en concreto el utilizado para mezclas bituminosas en caliente convencionales y a partir de éste, en función de los resultados obtenidos se modificaron los escalones de carga y las condiciones de ejecución. A este primer procedimiento se le denominó **REF-1**, y en la siguiente tabla se presentan las secuencias de compactación, indicando las características de cada una como son las cargas aplicadas o las condiciones de finalización de cada secuencia.

PASOS DE COMPACTACIÓN	Conditions	REF-1	
		END Condition	
<u>1</u> Move roller segment to tare position			
<u>2</u> Heating roller and mould	40°C		
<u>3</u> Move roller segment	speed (mm/sg) 6 Max Load (Kn) 0,5		
<u>4</u> Pass in/decreasing load/position	Position (mm/pass) 0,5 speed (mm/sg) 2	Load >= (kN)	2,6
<u>5</u> 7 Pasadas Fixed condition			
<u>6</u> ↑ 0,5 mm/pasada	speed (mm/sg) 10	Load <= (kN)	0,1=0
<u>7</u> Move roller segment	speed (mm/sg) 2 Max Load (Kn) 0,52		
<u>8</u> 15 Pasadas Fixed Load			
<u>9</u> ↓ 0,01 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	height (mm) or pass	66 4
<u>10</u> ↓ 1,5 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	Load >= (kN) height (mm)	10,5 66
<u>11</u> ↓ 1,5 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	Load >= (kN) height (mm)	19,5 66
<u>12</u> ↓ 0,01 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	height (mm) or pass	66 9
<u>13</u> ↓ 1,5 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	Load >= (kN) height (mm)	25,5 66
<u>14</u> ↓ 0,01 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	height (mm) or pass	66 9
<u>15</u> ↑ 2,5 kN/pass	speed (mm/sg) 30	Load <= (kN) or pass	0,1=0 20

Tabla 10. Procedimiento de compactación REF-1

La única variación que presenta este primer procedimiento de estudio con el utilizado para mezclas convencionales es la temperatura de calentamiento del molde y del rodillo, que pasa de 140°C a 40°C que es el máximo valor permitido para las emulsiones bituminosas para facilitar la trabajabilidad de la mezcla. El resto de condiciones y características de cada uno de los pasos es exactamente igual.

Las secuencias desde la 1 a la 10, son los primeros pasos de posicionamiento del compactador y acomodación de la mezcla en el interior del molde. Los pasos del 10 al 14, los sombreados en la tabla, son los pasos de compactación propiamente dichos. En el paso 10 se empieza a aplicar carga en cada pasada hasta alcanzar los 10,5 kN. En el siguiente paso, la carga sigue aumentando a la misma velocidad hasta llegar a 19,5 kN. En el paso 12

se realiza una regularización de la superficie, sin aumentar la carga alcanzada, haciendo 9 pasadas sobre la muestra. En el paso 13 se vuelve a aplicar carga hasta alcanzar la máxima que se aplica en todo este procedimiento, 25,5 kN, o hasta que la probeta alcanza la altura especificada. En el paso 14 se dan otras nueve pasadas sin aumentar la carga. En el último paso número 15, se descarga por completo el rodillo a una velocidad de 2,5 kN/pasada.

En la Figura 41 se representa gráficamente el procedimiento REF-1, en donde en el eje de ordenadas aparece la carga aplicada y en el eje de abscisas las distintas secuencias del procedimiento en estudio.

Al finalizar el ensayo el equipo muestra la gráfica donde se representa el número de pasadas realizadas en el eje de abscisas y la carga aplicada en cada pasada en el eje de ordenadas, como aparece en la Figura 40 como ejemplo del procedimiento de compactación REF-1.

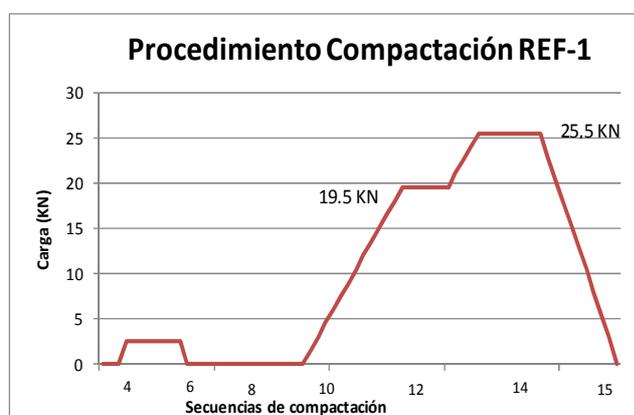


Figura 41. Cargas procedimiento compactación REF-1

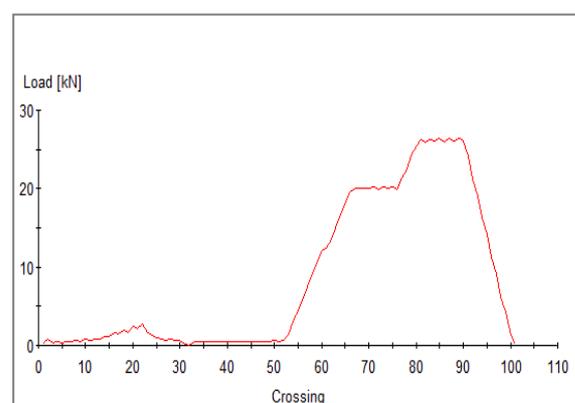


Figura 40. Cargas por pasada REF-1

Como se ha indicado en la metodología, se tomó el material fresado de obra, y utilizando la fórmula de trabajo, se preparó el material de igual manera que se realiza in situ en la recicladora. Se disgregó el material y se tamizó por el tamiz 25 mm, a continuación se adicionó el agua, el cemento (cuando así lo indicaba la fórmula de trabajo) y la emulsión en las mismas proporciones que las utilizadas durante la ejecución en obra. Una vez fabricada la mezcla, se vertió en el molde del compactador y se le aplicó el procedimiento de compactación a estudiar. A continuación, se pesó la probeta antes de someterla al proceso de curado forzoso, tal y como se ve en la Figura 42, y se secó en estufa a 50°C hasta peso constante. Una vez que pierde toda la humedad se determina la densidad de la probeta por el método descrito en la norma UNE-EN 12697-6, mediante el procedimiento "B", superficie saturada seca. (Figura 43)



Figura 42. Peso de las probetas



Figura 43. Determinación densidad probetas

Con el primer procedimiento de compactación, se realizaron dos probetas con el material procedente de la obra A-472 Huelva y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 11.

PROCEDIMIENTO COMPACTACIÓN	OBRA	Nº PROBETA	$D_{obra_{ref}}$ Kg/m ³	D_{lab} Probeta Kg/m ³	Compactación respecto a obra %	Espesor Probeta (mm)
REF-1	A-472 HUELVA	1	2080	2013	97%	58,60
	A-472 HUELVA	2	2080	1990	96%	61,10

Tabla 11. Resultados procedimiento REF-1

No se alcanzaron altas densidades, por lo que se elaboró un segundo procedimiento denominado **REF-2** en el que se mantenían todas las condiciones iguales al procedimiento anterior, pero se eliminaba la condición de que alcanzase la altura de 60 mm. Es decir, el esquema de las cargas aplicadas en cada una de las secuencias de compactación es el mismo presentado en la Figura 41, pero las condiciones de finalización de cada paso sí varían, como se refleja en la Tabla 12.

PROCEDIMIENTO	REF-2	
	Conditions	END Condition
1 Move roller segment to tare position		
2 Heating roller and mould	40°C	
3 Move roller segment	speed (mm/sg) 6 Max Load (Kn) 0,5	
4 Pass in/decreasing load/position	Position (mm/pass) 0,5 speed (mm/sg) 2	Load >= (kN) 2,6
5 7 Pasadas Fixed condition		
6 ↑ 0,5 mm/pasada	speed (mm/sg) 10	Load <=(kN) 0,1=0
7 Move roller segment	speed (mm/sg) 2 Max Load (Kn) 0,52	
8 15 Pasadas Fixed Load		
9 ↓ 0,01 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	pass 4
10 ↓ 1,5 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	Load >= (kN) 10,5
11 ↓ 1,5 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	Load >= (kN) 19,5
12 ↓ 0,01 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	pass 9
13 ↓ 1,5 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	Load >= (kN) 25,5
14 ↓ 0,01 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	pass 9
15 ↑ 2,5 kN/pass	speed (mm/sg) 30	Load <=(kN) 0,1=0 or pass 20

Tabla 12. Procedimiento de compactación REF-2

Se preparó muestra para realizar las probetas de 256 x 407 x 60 mm y se fabricaron cuatro de dos obras distintas. El proceso seguido fue el mismo utilizado en todos los casos: fabricación de la mezcla reciclada en frío en laboratorio conforme a la fórmula de trabajo aplicada en obra, compactación mediante el procedimiento correspondiente, secado en estufa a 50°C hasta peso constante y determinación de la densidad aparente mediante procedimiento superficie saturada seca. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 13.

PROCEDIMIENTO COMPACTACIÓN	OBRA	Nº PROBETA	Dobra _{ref} Kg/m ³	D _{lab} Probeta Kg/m ³	Compactación respecto a obra %	Espesor Probeta (mm)
REF- 2	A-472 HUELVA	3	2080	2170	104%	57,43
	A-472 HUELVA	4	2080	2180	105%	57,66
	KANSAS-CITY	5	2110	2215	105%	56,92
	KANSAS-CITY	6	2110	2230	106%	57,10

Tabla 13. Resultados procedimiento REF-2

Se observa que las densidades alcanzadas superaron las obtenidas en obra. Se estaba



Figura 44. Deterioros en la probeta

aplicando una compactación más fuerte de la necesaria para alcanzar la densidad deseada, por lo que se diseñó un tercer procedimiento, en el que se obtuviese un porcentaje de compactación en torno al 100%. Este es el procedimiento **REF-3**. En esta ocasión, se preparó muestra para fabricar probetas de 256x407x65 mm, ya que se había detectado, que las probetas presentaban mala cohesión por los márgenes y se deshacían al manejarlas, Figura 44, por lo que aumentando el espesor, se aseguraba el

poder extraer posteriormente testigos con espesor suficiente para poder ensayarlos, aunque hubiese que recortarlos si se deterioraran por los bordes. En este procedimiento, se disminuyó la carga máxima aplicada en un 5% en los pasos de compactación propiamente dicho, es decir, en las secuencias 10, 11 y 13. En la Tabla 14 se muestra como quedaron los pasos finales de este procedimiento de compactación.

PROCEDIMIENTO		REF-3	
		Conditions	END Condition
1	Move roller segment to tare position		
2	Heating roller and mould	40°C	
3	Move roller segment	speed (mm/sg) 6 Max Load (Kn) 0,5	
4	Pass in/decreasing load/position	Position (mm/pass) 0,5 speed (mm/sg) 2	Load >= (kN) 2,6
5	7 Pasadas Fixed condition		
6	↑ 0,5 mm/pasada	speed (mm/sg) 10	Load <=(kN) 0,1=0
7	Move roller segment	speed (mm/sg) 2 Max Load (Kn) 0,52	
8	15 Pasadas Fixed Load		
9	↓ 0,01 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	pass 4
10	↓ 1,5 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	Load >= (kN) 10
11	↓ 1,5 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	Load >= (kN) 18,5
12	↓ 0,01 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	pass 9
13	↓ 1,5 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	Load >= (kN) 24,2
14	↓ 0,01 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	pass 9
15	↑ 2,5 kN/pass	speed (mm/sg) 30	Load <=(kN) 0,1=0 or pass 20

Tabla 14. Procedimiento REF-3

El esquema de las cargas aplicadas en cada uno de los pasos de compactación, se presenta en la Figura 45.

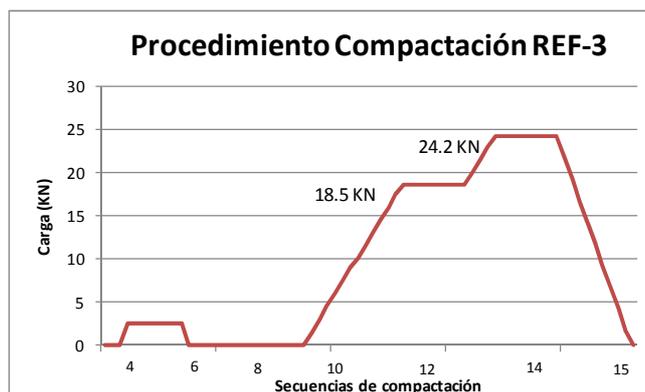


Figura 45. Cargas procedimiento de compactación REF-3

Con este tercer procedimiento se fabricaron otras tres probetas, y las densidades alcanzadas fueron muy próximas a las de referencia de obra, como puede apreciarse en la Tabla 15.

PROCEDIMIENTO COMPACTACIÓN	OBRA	Nº PROBETA	$D_{obra_{ref}}$ Kg/m ³	D_{lab} Probeta Kg/m ³	Compactación respecto a obra %	Espesor Probeta (mm)
REF-3	ECIJA- OSUNA	7	2070	2058	99%	65,71
	A-472 HUELVA	8	2140	2092	98%	66,23
	A-472 HUELVA	9	2080	2120	102%	64,87

Tabla 15. Resultados procedimiento REF-3

Se definió un cuarto procedimiento de compactación, aumentando de nuevo la carga, para intentar acercarse a la densidad al 100% de la densidad de referencia, ya que dos probetas se habían quedado por debajo de la densidad buscada. En esta ocasión sólo se aumentó ligeramente la compactación en la secuencia número 11, ya que no se quería producir un exceso en la aplicación de la carga. De esta forma, se aumentó la compactación en un paso intermedio, sin elevar demasiado la carga máxima, ya que en una de ellas se había sobrepasado el 100%. Así, las secuencias de este procedimiento **REF-4** quedan reflejadas en la Tabla 16 y el esquema de las cargas aplicadas en cada secuencia en la Figura 46.

PROCEDIMIENTO		REF-4	
SECUENCIAS		Conditions	END Condition
<u>1</u>	Move roller segment to tare position		
<u>2</u>	Heating roller and mould	40°C	
<u>3</u>	Move roller segment	speed (mm/sg) 6 Max Load (Kn) 0,5	
<u>4</u>	Pass in/decreasing load/position	Position (mm/pass) 0,5 speed (mm/sg) 2	Load >= (kN) 2,6
<u>5</u>	7 Pasadas Fixed condition		
<u>6</u>	↑ 0,5 mm/pasada	speed (mm/sg) 10	Load <= (kN) 0,1=0
<u>7</u>	Move roller segment	speed (mm/sg) 2 Max Load (Kn) 0,52	
<u>8</u>	15 Pasadas Fixed Load		
<u>9</u>	↓ 0,01 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	pass 4
<u>10</u>	↓ 1,5 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	Load >= (kN) 10
<u>11</u>	↓ 1,5 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	Load >= (kN) 19
<u>12</u>	↓ 0,01 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	pass 9
<u>13</u>	↓ 1,5 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	Load >= (kN) 24,2
<u>14</u>	↓ 0,01 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	pass 9
<u>15</u>	↑ 2,5 kN/pass	speed (mm/sg) 30	Load <= (kN) 0,1=0 or pass 20

Tabla 16. Procedimiento de compactación REF-4

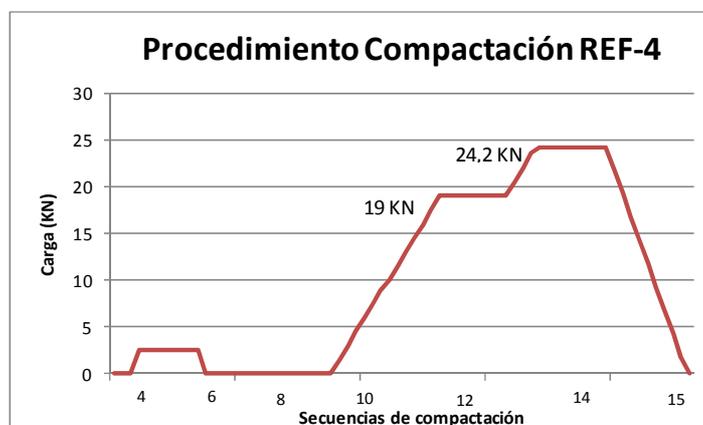


Figura 46. Cargas procedimiento de compactación REF-4

Con este procedimiento se realizan dos probetas más, y los resultados obtenidos, se reflejan en la Tabla 17.

PROCEDIMIENTO COMPACTACIÓN	OBRA	Nº PROBETA	Dobra _{ref} Kg/m ³	Dlab Probeta Kg/m ³	Compactación respecto a obra %	Espesor Probeta (mm)
REF-4	ECIJA- OSUNA	10	2040	2100	103%	63,46
	A-472 HUELVA	11	2040	2220	104%	62,65

Tabla 17. Resultados procedimiento REF-4

Se observa que se sobrepasó en las dos muestras fabricadas la densidad de referencia de obra. Se estimó entonces que el procedimiento REF-3 era el adecuado para reproducir en el laboratorio el material reciclado obtenido en obra.

Resumiendo, se han estudiado cuatro procedimientos de compactación con distintas cargas aplicadas, partiendo como base, del programa de compactación utilizado para las mezclas bituminosas en caliente. Mediante pequeñas variaciones en las cargas de este procedimiento, se ha podido determinar el adecuado para el tipo de mezclas bituminosas recicladas en frío. Los cuatro procedimientos analizados se presentan en la Tabla 18.

PASOS DE COMPACTACIÓN	Conditions	PROCEDIMIENTOS DE COMPACTACIÓN			
		REF-1	REF-2	REF-3	REF-4
1 Move roller segment to tare position		END Condition	END Condition	END Condition	END Condition
2 Heating roller and mould	40°C				
3 Move roller segment	speed (mm/sg) 6 Max Load (Kn) 0,5				
4 Pass in/decreasing load/position	Position (mm/pass) 0,5 speed (mm/sg) 2	Load >= (kN) 2,6	Load >= (kN) 2,6	Load >= (kN) 2,6	Load >= (kN) 2,6
5 7 Pasadas Fixed condition					
6 ↑ 0,5 mm/pasada	speed (mm/sg) 10	Load<=(kN) 0,1=0	Load<=(kN) 0,1=0	Load<=(kN) 0,1=0	Load<=(kN) 0,1=0
7 Move roller segment	speed (mm/sg) 2 Max Load (Kn) 0,52				
8 15 Pasadas Fixed Load					
9 ↓ 0,01 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	height (mm) 66 or pass 4	pass 4	pass 4	pass 4
10 ↓ 1,5 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	Load >= (kN) 10,5 height (mm) 66	Load >= (kN) 10,5	Load >= (kN) 10	Load >= (kN) 10
11 ↓ 1,5 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	Load >= (kN) 19,5 height (mm) 66	Load >= (kN) 19,5	Load >= (kN) 18,5	Load >= (kN) 19
12 ↓ 0,01 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	height (mm) 66 or pass 9	pass 9	pass 9	pass 9
13 ↓ 1,5 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	Load >= (kN) 25,5 height (mm) 66	Load >= (kN) 25,5	Load >= (kN) 24,2	Load >= (kN) 24,2
14 ↓ 0,01 Kn/pass	speed (kN/sg) 1	height (mm) 66 or pass 9	pass 9	pass 9	pass 9
15 ↑ 2,5 kN/pass	speed (mm/sg) 30	Load<=(kN) 0,1=0 or pass 20	Load<=(kN) 0,1=0 or pass 20	Load<=(kN) 0,1=0 or pass 20	Load<=(kN) 0,1=0 or pass 20

Tabla 18. Procedimientos de compactación

Se ha realizado una batería de 11 probetas con distintos procedimientos de compactación, variando la carga aplicada, y se estima que el más adecuado para reproducir probetas de material reciclado en laboratorio es el REF-3.

En la Tabla 19 se recogen todas las probetas fabricadas para la determinación del procedimiento de compactación adecuado para mezclas recicladas in situ en frío con emulsión bituminosa.

PROCEDIMIENTO COMPACTACIÓN	OBRA	Nº PROBETA	$D_{obra_{ref}}$ Kg/m ³	D_{lab} Probeta Kg/m ³	Compactación respecto a obra %	Espesor Probeta (mm)
REF-1	A-472 HUELVA	1	2080	2013	97%	58,60
	A-472 HUELVA	2	2080	1990	96%	61,10
REF-2	A-472 HUELVA	3	2080	2170	104%	57,43
	A-472 HUELVA	4	2080	2180	105%	57,66
	KANSAS-CITY	5	2110	2215	105%	56,92
	KANSAS-CITY	6	2110	2230	106%	57,10
REF-3	ECIJA- OSUNA	7	2070	2058	99%	65,71
	A-472 HUELVA	8	2140	2092	98%	66,23
	A-472 HUELVA	9	2080	2120	102%	64,87
REF-4	ECIJA- OSUNA	10	2040	2100	103%	63,46
	A-472 HUELVA	11	2040	2220	104%	62,65

Tabla 19. Probetas realizadas para determinación del procedimiento de compactación

NOTA: Mencionar que aparte de estas once probetas, se hicieron algunas más que tuvieron que ser desechadas por distintos motivos, como fueron paradas imprevistas en el compactador, o desmoronamiento de las probetas al determinar la densidad en alguna de ellas.

4.4. ELABORACIÓN DE PROBETAS EN LABORATORIO

Definido el procedimiento de compactación adecuado para las mezclas recicladas en frío, se procede a realizar una serie de probetas con el material fresado que queda de de las distintas obras y con la misma metodología utilizada en la fabricación de todas las probetas anteriores. Se hacen un total de 14 probetas de las que se extraen los testigos necesarios para realizar los ensayos mecánicos de caracterización. Una de las probetas se realiza con el material procedente de la obra de refuerzo de la A-351 Écija-Osuna, otras doce con material de la obra de la A-472 de Huelva y una última probeta con el material de la obra urbana de refuerzo de firme en la Avenida Kansas City de Sevilla. En la Tabla 20 se presentan las densidades alcanzadas en las probetas fabricadas. Estas densidades se determinan una vez que han perdido toda la humedad tras el proceso de curado forzoso al que han estado sometidas. El tiempo medio de permanencia en la estufa a 50°C hasta peso constante ha sido de siete días.

OBRA	Nº PROBETA	Dobra _{ref} Kg/m ³	D _{lab} Probeta Kg/m ³	% Dobra _{ref}
ÉCIJA OSUNA	1	2070	2081	101%
HUELVA	2	2080	2117	102%
HUELVA	3	2080	2135	103%
HUELVA	4	2080	2131	102%
HUELVA	5	2140	2135	100%
HUELVA	6	2140	2117	99%
HUELVA	7	2140	2121	99%
HUELVA	8	2140	2116	99%
HUELVA	9	2140	2113	99%
HUELVA	10	2140	2106	98%
HUELVA	11	2140	2144	100%
HUELVA	12	2140	2132	100%
HUELVA	13	2140	2127	99%
KANSAS CITY	14	2110	2082	99%

Tabla 20. Densidades de las probetas fabricadas con el procedimiento definitivo

Si se observa el porcentaje de compactación obtenido en las probetas, representado en la Figura 47, se puede afirmar que el procedimiento elegido reproduce con bastante fidelidad la densidad de referencia. Las densidades de todas las probetas están muy próximas al 100%

de la densidad de obra de referencia, es decir, el material que se ha fabricado en laboratorio es prácticamente igual que al extendido en obra.

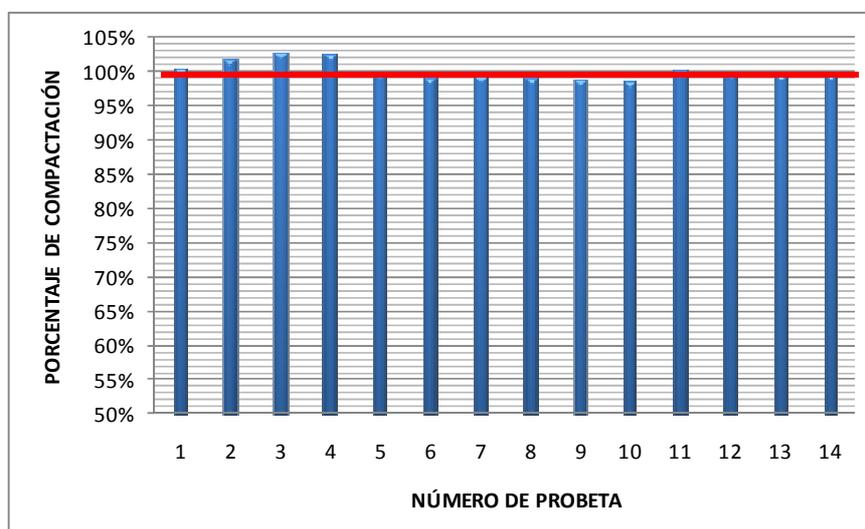


Figura 47. Porcentajes de compactación de las probetas de laboratorio

NOTA: Al igual que durante el estudio del procedimiento de compactación, se perdió parte de material por motivos imprevistos en el desarrollo de los trabajos, es por esto por lo que el número de especímenes fabricados no ha podido ser mayor, por la limitación de material fresado disponible.

4.5. ENSAYOS MECÁNICOS

El siguiente paso ha sido extraer testigos de estas probetas para ensayarlos en laboratorio y comprobar si los resultados obtenidos son similares a los obtenidos en los mismos ensayos realizados sobre testigos extraídos directamente de obra. Se denominarán testigos de laboratorio a los extraídos de las probetas fabricadas en laboratorio con el nuevo procedimiento de compactación determinado en la primera fase de la investigación y testigos de obra a los que han sido extraídos directamente de la obra donde se ha llevado a cabo la actuación de reciclado.

Se ha utilizado una corona de diamante de 100 mm de diámetro. La distribución planteada para la extracción de los testigos en la probeta se observa en la siguiente figura:

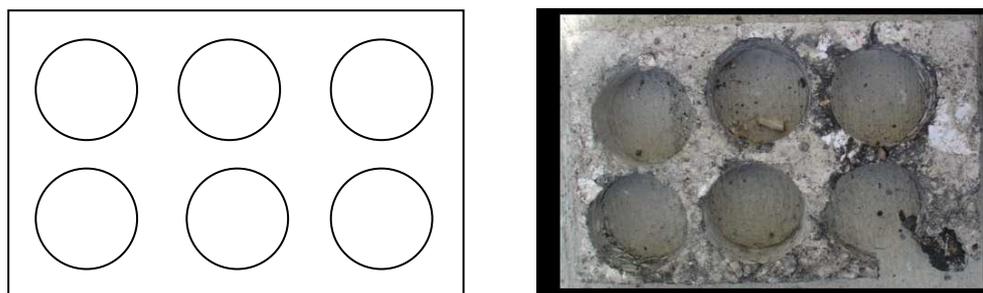


Figura 48. Disposición de testigos en probeta

Sin embargo, al introducir el equipo extractor y utilizar el agua para la refrigeración, algunas de las probetas se han desmoronado especialmente por las esquinas por lo que no siempre se han podido extraer 6 especímenes de cada una ellas. Alguna incluso, como es el caso de la probeta número 5, se desmoronó en su totalidad cuando intentamos extraer los testigos de la misma. La probeta número 3 también se deterioró bastante al manipularla, como se aprecia en la Figura 49 y finalmente sólo se pudo extraer un testigo de la misma. Con la número 9 ocurrió el mismo problema y finalmente los dos testigos de estas probetas tuvieron que ser desechados por deterioro notable.



Figura 49. Probeta número 3

En la Tabla 21 se muestra el número de testigos que se ha conseguido de cada probeta y el espesor de los mismos una vez recortados para igualar sus caras y poder ensayarlos. Las probetas se secaron hasta peso constante en estufa, y posteriormente se fueron almacenando a temperatura ambiente hasta el momento en que se extrajeron los testigos. Es decir, que, como las probetas fueron fabricadas durante el último trimestre del año 2010 y principios del año 2011 y los testigos se comenzaron a extraer en enero del mismo año empezando por las primeras probetas fabricadas, todos tienen todos una edad entre tres y

seis meses, cuando se han realizado los ensayos de módulos y tracciones indirectas y de tres meses como mínimo, cuando se han realizado los ensayos de fatiga.

OBRA	Nº PROBETA	TESTIGOS	Dobra _{ref} Kg/m ³	D _{lab} Testigo (Kg/m ³)	% D testigo / Obra	Espes. Testg (mm)
ÉCIJA - OSUNA	1	R1	2070	2114	102%	39,1
		R2		2116	102%	38,7
		R3		2089	101%	37,5
		R4		2087	101%	37,0
		R5		2104	102%	37,8
HUELVA	2	R6	2080	2203	106%	39,9
		R7		2164	104%	42,4
		R8		2200	106%	40,0
		R9		2206	106%	38,9
HUELVA	3	R10	2080	2136	103%	33,1
HUELVA	4	R11	2080	2163	104%	31,5
		R12		2200	106%	35,0
		R13		2180	105%	27,2
		R14		2187	105%	44,2
HUELVA	5	SE DESHACE AL MANIPULARLA				
HUELVA	6	R15	2140	2177	102%	33,8
		R16		2213	103%	32,8
		R17		2198	103%	39,9
		R18		2195	103%	28,8
		R19		2212	103%	33,9
HUELVA	7	R20	2140	2160	101%	46,0
		R21		2180	102%	53,4
		R22		2156	101%	55,3
		R23		2152	101%	42,0
		R24		2128	99%	47,2
		R25		2181	102%	34,8

Tabla 21. Testigos extraídos de probetas de laboratorio (a)

OBRA	Nº PROBETA	TESTIGOS	Dobra _{ref} Kg/m ³	D _{lab} Testigo (Kg/m ³)	% D testigo / Obra	Espes. Testg (mm)
HUELVA	8	R26	2140	2151	101%	37,0
		R27		2145	100%	42,9
		R28		2120	99%	37,2
		R29		2145	100%	34,9
		R30		2173	102%	40,6
HUELVA	9	R31	2140	2172	101%	35,8
HUELVA	10	R32	2140	2114	99%	41,8
		R33		2080	97%	39,4
		R34		2102	98%	33,3
		R35		2093	98%	37,8
		R36		2083	97%	35,6
HUELVA	11	R37	2140	2091	98%	67,1
		R38		2143	100%	65,1
		R39		2153	101%	66,0
		R40		2163	101%	66,3
		R41		2148	100%	65,7
		R42		2109	99%	25,1
HUELVA	12	R43	2140	2123	99%	36,9
		R44		2099	98%	37,0
		R45		2129	99%	40,6
		R46		MUY DETERIORADO		
		R47		MUY DETERIORADO		
		R48		MUY DETERIORADO		
HUELVA	13	R49	2140	2134	100%	68,3
		R50		2098	98%	70,0
		R51		2120	99%	67,4
		R52		2090	98%	67,1
		R53		2103	98%	68,5
		R54		MUY DETERIORADO		
TOTAL TESTIGOS EXTRAÍDOS		54				

Tabla 21. Testigos extraídos de probetas de laboratorio (b)

En total, se extrajeron 54 testigos. La mayoría de ellos tuvieron que ser recortados, ya que en el proceso de extracción se vieron dañados por los bordes. De los 54 testigos extraídos, cuatro se estropearon al recortarlos y se tuvieron que desechar. Quedaron 50 a los que se les determinó la densidad.

Las densidades alcanzadas en los testigos están reflejadas en la Tabla 21.

Si se observan estos datos representados en la

Figura 50 para los testigos de las probetas fabricadas con material procedente de la obra A-351 Écija-Osuna y en la Figura 51 para los testigos extraídos de las probetas fabricadas con material procedente de la obra A-472 Huelva, se aprecia que la mayoría de los valores están alrededor del 100 % de la densidad de obra de referencia, lo que indica que el método de compactación de las probetas en laboratorio estudiado en este trabajo es correcto y reproduce con fidelidad el material reciclado puesto en obra.

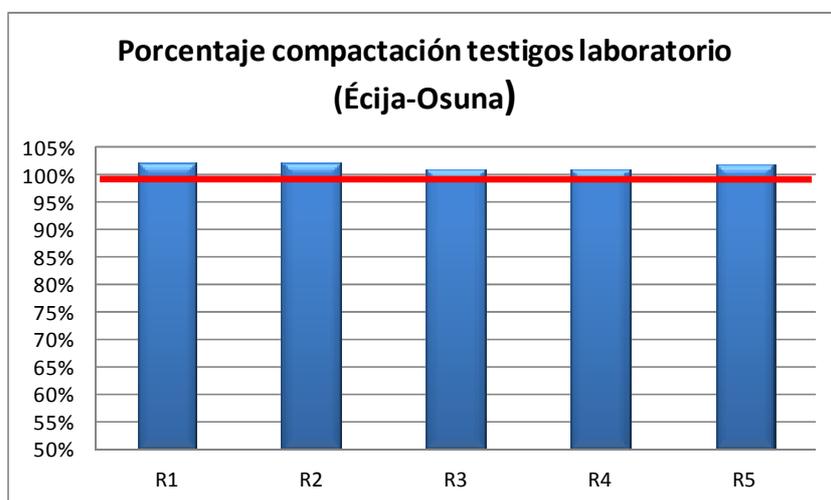


Figura 50. Compactación testigos laboratorio obra A-351 Écija-Osuna

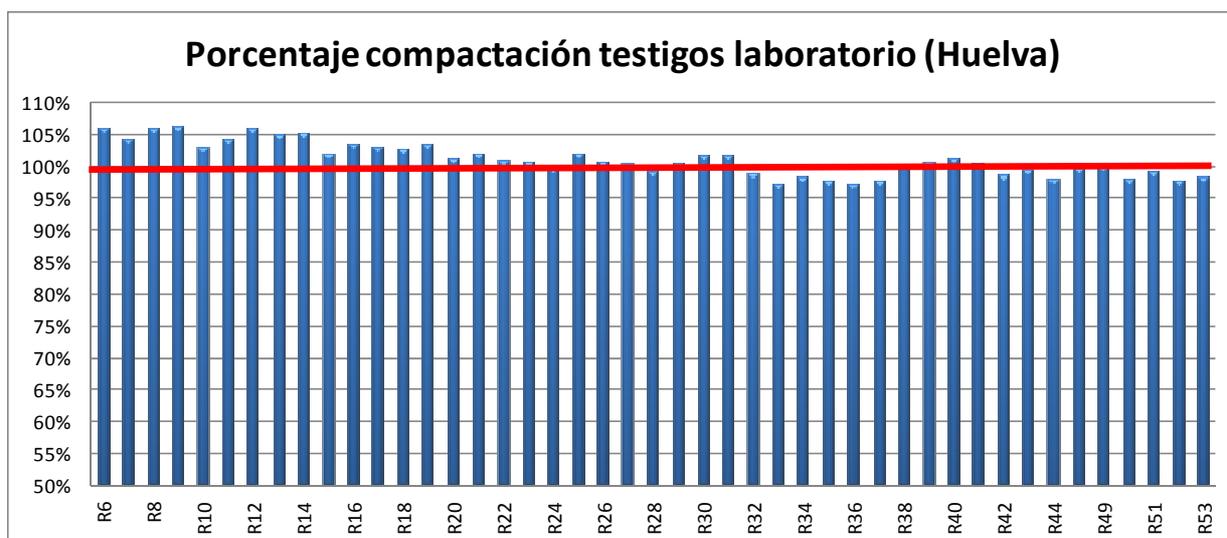


Figura 51. Compactación testigos laboratorio obra A-472

Los espesores conseguidos al recortarlos varían desde 27 mm hasta 60 mm. Este hecho ha condicionado la elección de unos testigos u otros para la realización de cada ensayo.

Tal y como se ha descrito en el apartado correspondiente de la metodología, los ensayos a utilizar en esta investigación son tracción indirecta, módulos dinámicos y determinación de la vida a fatiga. Las limitaciones de espesores de los testigos para cada uno de estos ensayos son las siguientes:

Para el ensayo de *Tracción Indirecta*, la norma UNE-EN 12697-23, en el epígrafe “6.2 Dimensiones de la probeta” especifica que la altura de la probeta debe estar comprendida *entre 35 mm y 75 mm*.

En la norma UNE-EN 12697-26, Anexo C que describe el procedimiento para determinar el “*Módulo Dinámico* mediante el ensayo de tracción indirecta en probetas cilíndricas”, se indica en el epígrafe “C.3.1 Preparación de la probeta” que éstas deben tener un espesor comprendido *entre 30 mm y 75 mm*.

En la norma UNE-EN 12697-24, Anexo E, para determinar la vida a *fatiga* del material reciclado, en el epígrafe “E.3.2. Dimensiones de la probeta” se especifica que la probeta debe tener al menos un *espesor de 40 mm* para una granulometría máxima de 25 mm.

Teniendo en cuenta estas condiciones, y a criterio del autor en función de la apariencia de los testigos se han realizado los siguientes ensayos:

Tracciones Indirectas: 23 ensayos de TI

Módulos Dinámicos: 29 ensayos de MD

Fatiga: 11

Como se ha señalado en la Metodología, el ensayo de determinación de Módulo Dinámico es un ensayo no destructivo, es decir, se pueden volver a ensayar los mismos testigos utilizados para determinar este parámetro. Aún así, para comprobar esta afirmación, se ha realizado un estudio comparativo, rompiendo a tracción indirecta dos series de testigos, en una se ha determinado previamente el Módulo Dinámico y en otra no. Como se puede ver en la Tabla 22, la diferencia a tracción indirecta entre los testigos a los que se les ha determinado el módulo y los otros es prácticamente inapreciable, por lo que se podrán utilizar testigos a los que se les haya determinado el módulo dinámico para realizar otros ensayos.

RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA (MPa)		CON MÓDULO	SIN MÓDULO
TESTIGOS DE LA PROBETA Nº 2	SECO	0,5218	0,4849
	HÚMEDO	0,5134	0,4872
TESTIGOS DE LA PROBETA Nº 8	SECO	0,3700	0,3689
	HÚMEDO	0,36533	0,3681

Tabla 22. Valores Resistencias TI con y sin determinación de módulos

Una vez comprobado que este ensayo dinámico no afecta a las características resistentes de los testigos, queda asegurado que se pueden realizar ensayos de resistencia a tracción indirecta sobre testigos que previamente hayan sido ensayados para determinar el módulo dinámico de la mezcla.

De esta manera se han podido ensayar un número más elevado de testigos, realizando en trece testigos ensayos duplicados de módulos y tracción indirecta.

Tras hablar con las administraciones correspondientes, se consiguió obtener, de algunas de las obras ejecutadas mediante esta técnica y de las que se había recogido el material para estudiar, testigos extraídos del pavimento para ensayarlos en laboratorio. De esta forma se pudieron comparar los resultados obtenidos en los testigos extraídos de probetas fabricadas en laboratorio y los obtenidos en los testigos extraídos de obra.

De la obra A-351 Écija-Osuna, se recibieron 14 testigos, de los cuales se tuvo que desechar uno, ya que se encontraba muy deteriorado. En los demás se cortó la capa correspondiente al reciclado y se determinó la densidad (Tabla 23). Al recortarlos, algunos se deterioraron por los bordes (Figura 52), aunque aún así se les determinó su densidad según norma UNE-EN 12697-6, procedimiento B, superficie saturada seca y su espesor medio.



Figura 52. Testigos de obra

Estos testigos fueron los denominados T3, T8, T11, T12 y T 14 y se decidió no someterlos a ensayo.

De la obra A-472 Huelva, se recibieron 12 testigos que finalmente se quedaron en 11 ya que también hubo que descartar el testigo número 8. Estos testigos fueron recortados en espesor variable, intentando conseguir muestras lo más homogéneas posible para ser ensayados en laboratorio. A continuación se les determinó la densidad de la misma manera que en el caso anterior y sólo hubo un testigo, el T9 que se desestimó para ensayarlo. El resumen de los testigos de obra se recoge en las tablas 23 y 24.

Nº TESTIGO	P.K.	ESPESOR (mm)	Densidad (Kg/m ³)
1	18+000 M.D Siliceo	75,1	2135
2	22+000 M.D Siliceo	58,3	2094
3	27+500 M.D. Siliceo	90,6	2152
4	30+000 M.D. Siliceo	55,8	2120
5	29+000 MI Siliceo	63,7	2140
6	26+000 MI Calizo	69,1	2132
7	24+000 MI Siliceo	49,9	2137
8	20+000 MI Siliceo	62,4	2146
9	15+000 M.I. Siliceo	59,8	2168
10	10+000 M.I. Siliceo	62,4	2198
11	6+500 MI Siliceo	57,3	2140
12	5+000 MI silieo	61,6	2148
14	13+000 M.D. Siliceo	89,1	2129

Tabla 23. Testigos de obra A-351 Écija-Osuna

Nº TESTIGO	P.K.	ESPESOR (mm)	DENSIDAD(Kg /m ³)
1	19+000 MD	76	2136
2	20+000 M.D	40	2288
3	27+000 MD	66	2135
4	34+000 M.D.	54	2208
5	48+500 M.D.	50	2089
6	50+000 MD	64	2142
7	53+000 M.I.	41	2159
9	37+000 M.I.	64	2189
10	35+000 M.I.	61	2210
11	26+000 M.I.	44	2154
12	21+000 M.I.	67	2134

Tabla 24. Testigos de obra A-472 Huelva

De estos testigos de obra, se han ensayado un total de 16 módulos y 9 tracciones indirectas. Los resultados de estos ensayos han sido comparados con los correspondientes de los testigos de laboratorio.

En resumen, el número total de testigos disponibles para ensayar, tanto de obra como extraídos de las probetas fabricadas en laboratorio, se refleja en la tabla siguiente:

	TESTIGOS DE LABORATORIO	TESTIGOS DE OBRA
ÉCIJA-OSUNA	5	8
HUELVA	45	10
TOTAL	50	18

Tabla 25. Número total de Testigos

A continuación se van a analizar los trabajos realizados por ensayos.

4.5.1. MÓDULOS DINÁMICOS

Se han realizado un total de 45 módulos mediante el ensayo descrito en la norma UNE-EN 12697-26, Anexo C: “Módulo Dinámico mediante el ensayo de tracción indirecta en probetas cilíndricas”. De estos 45 testigos ensayados, 29 han sido extraídos de las probetas fabricadas en laboratorio con el material fresado procedente de las obras de Écija-Osuna y Huelva y 16 han sido extraídos directamente de la calzada definitiva,

Tabla 26.

	TESTIGOS DE LABORATORIO	TESTIGOS DE OBRA	TOTAL MÓDULOS ENSAYADOS
ÉCIJA-OSUNA	5	7	12
HUELVA	24	9	33
TOTAL	29	16	45

Tabla 26. Número de Módulos Dinámicos determinados

Los ensayos se han realizado a 20°C, y el módulo de rigidez de la probeta se ha obtenido como la media de los valores obtenidos en dos ensayos realizados sobre la misma probeta girada 90° de su primera posición a la segunda.

Los resultados de los módulos de los testigos de laboratorio se muestran en la Tabla 27.

TESTIGO	DENSIDAD TESTIGO (Kg/m ³)	% D TESTIGO / D OBRA	ESPESOR TESTIGO (mm)	MÓDULO DINÁMICO 20°C (Mpa)
R1	2114	102%	39,1	2.656
R2	2116	102%	38,7	2.898
R3	2089	101%	37,5	2.305
R4	2087	101%	37,0	2.858
R5	2104	102%	37,8	2.903
R6	2203	106%	39,9	2.521
R7	2164	104%	42,4	2.989
R11	2163	104%	31,5	2.052
R12	2200	106%	35,0	2.117
R14	2187	105%	44,2	2.148
R19	2212	103%	33,9	2.101
R20	2160	101%	46,0	3.621
R22	2156	101%	55,3	2.211
R23	2152	101%	42,0	2.936
R29	2145	100%	34,9	2.635
R30	2173	102%	40,6	3.528
R36	2083	97%	35,6	3.006
R39	2153	101%	66,0	2.986
R40	2163	101%	66,3	3.868
R41	2148	100%	65,7	3.840
R42	2109	99%	25,1	3.998
R43	2123	99%	36,9	3.543
R44	2099	98%	37,0	3.437
R45	2129	99%	40,6	3.875
R49	2134	100%	68,3	3.647
R50	2098	98%	70,0	2.834
R51	2120	99%	67,4	3.798
R52	2090	98%	67,1	2.504
R53	2103	98%	68,5	2.924

Tabla 27. Módulos testigos de laboratorio

Son un total de 29 resultados, que al representarlos gráficamente, en la Figura 53, se observa que la mayoría de los valores se mueve en una horquilla de 2000 a 4000 megapascales. Teniendo en cuenta que normalmente los materiales reciclados se rigidizan con el tiempo, se puede pensar que alcanzarán valores que harán que la capa de material reciclado sea una capa muy cualificada para resistir las sollicitaciones a las que se verá sometida por acción del tráfico.

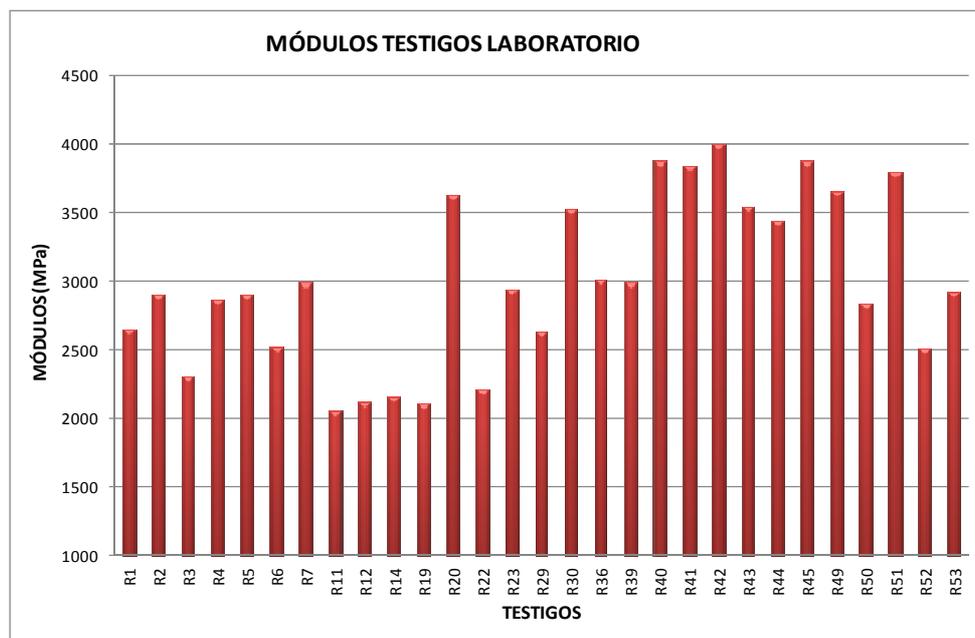


Figura 53. Módulos Testigos de Laborato

Aunque el número de testigos de laboratorio obtenidos de la obra A-351 Écija-Osuna es bastante reducido se van a analizar a continuación los valores de los módulos obtenidos en testigos de laboratorio y los de testigos de obra de una y otra obra.

Obra A-351 Écija-Osuna

En la Figura 54 se puede apreciar la similitud entre los valores obtenidos en los testigos fabricados en el laboratorio y los testigos de obra.

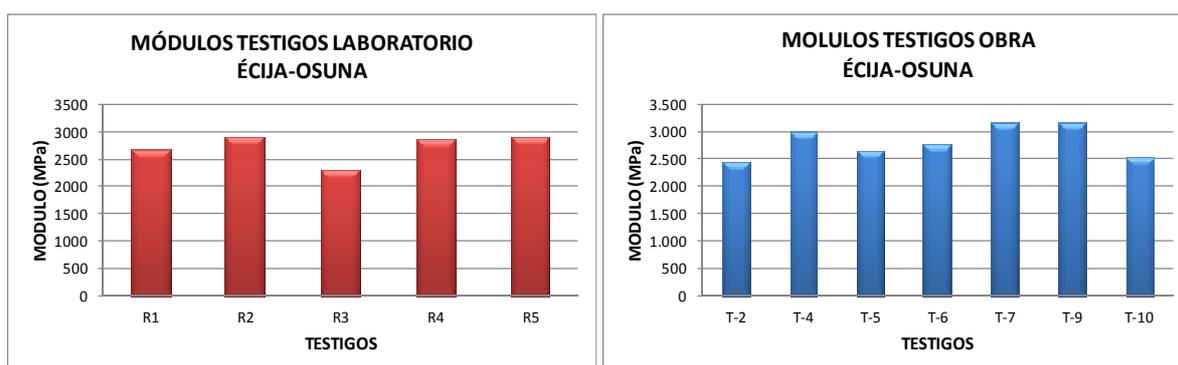


Figura 54. Módulos laboratorio/Módulos obra A-351 Écija-Osuna

En ambos casos los valores oscilan entre los 2.440 MPa, valor más bajo del testigo de laboratorio R3 y los 3.174 MPa del testigo de obra T-9.

Obra A-472 Huelva

De esta obra sí se ha podido reunir un número de datos más elevado tanto de probetas fabricadas en laboratorio como de testigos extraídos en obra.

Los valores obtenidos de los testigos extraídos de probetas fabricadas en laboratorio se representan en la Figura 55.

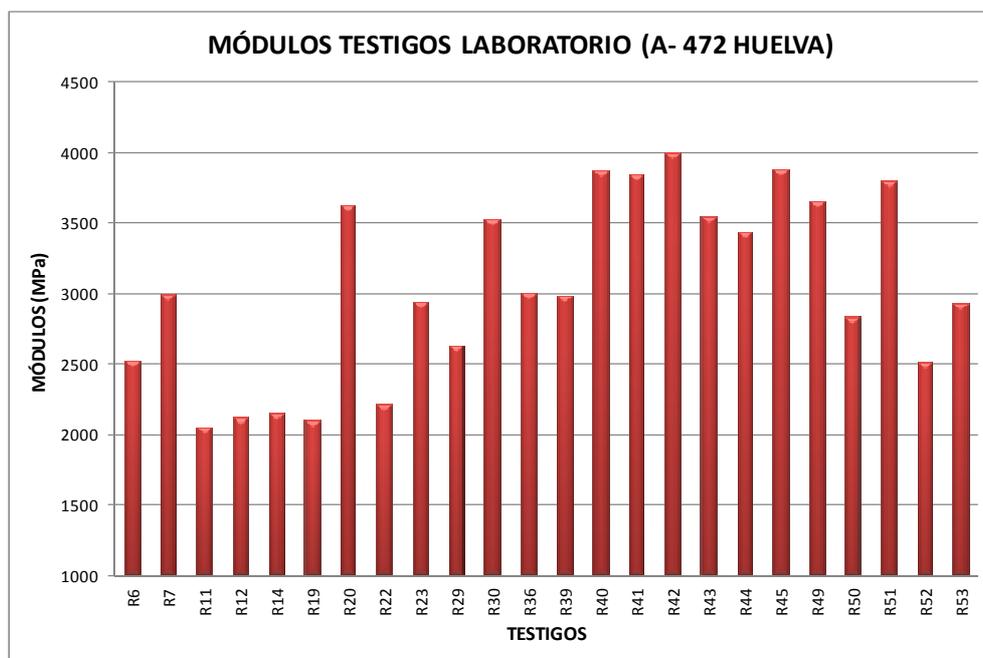


Figura 55. Módulos testigos laboratorio A-472 Huelva

En este caso la horquilla de valores obtenidos se extiende desde los 2.000 MPa hasta los 3.998 MPa que alcanza el testigo R42, máximo valor de los testigos ensayados de laboratorio.

Por otra parte los módulos obtenidos al ensayar los testigos de obra se presentan en la Figura 56.

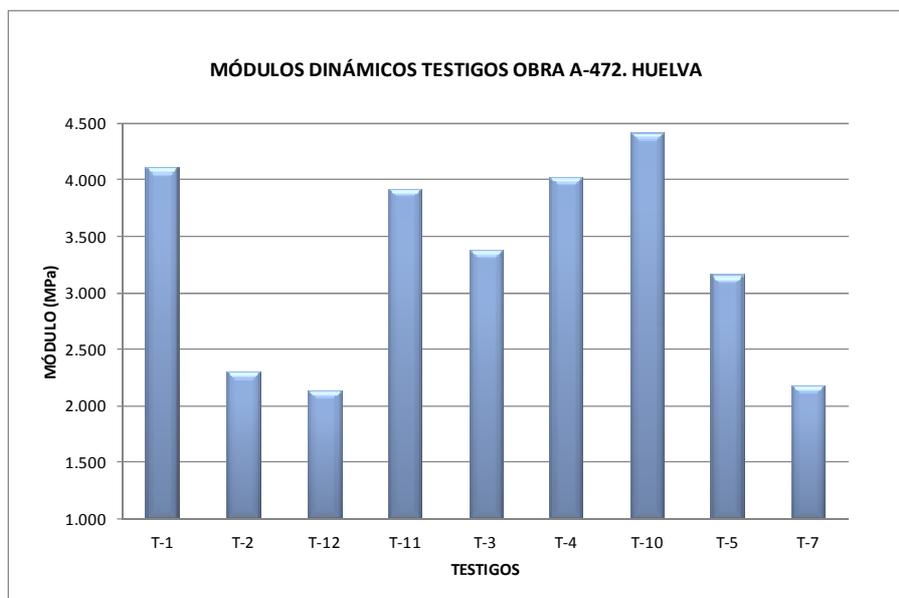


Figura 56. Módulos testigos obra A-472 Huelva

Los valores obtenidos en los testigos de obra también se mueven en el rango de valores de 2.000 hasta más de 4.000 MPa en algunos casos. Para comparar resultados, se agrupan los valores de los módulos por puntos kilométricos tanto de los valores de las probetas fabricadas en laboratorio como de los valores obtenidos en los testigos extraídos directamente de obra. Como no se disponía de muestras de todos los puntos kilométricos, se han comparado los módulos de obra con las medias de módulos de testigos de laboratorio fabricados con muestras de ubicaciones cercanas al testigo de obra (± 3 kilómetros de distancia). Los resultados, que se han analizado de esta manera, quedan reflejados en la Tabla 28 y en la Figura 57

TESTIGOS OBRA		TESTIGOS LABORATORIO			
PK	MÓDULO (MPa)	MÓDULO MEDIO (MPa)	MÓDULO INDIVIDUAL (Mpa)	TESTIGO	PK
19+000	4105	3.484	3006	R36	20+090
			3647	R49	20+090
			3798	R51	20+090
20+000	2301	2.754	2834	R50	20+090
			2924	R53	20+090
			2504	R52	20+090
21+000	2134	2.101	2101	R19	20+090
26+000	3917	3.574	3621	R20	27+880
			3528	R30	27+880
27+000	3373	2.594	2211	R22	27+880
			2936	R23	27+880
			2635	R29	27+880
34+000	4027	3.565	3840	R41	37+000
			3868	R40	37+000
			2986	R39	37+000
35+000	4412	3.713	3875	R45	37+000
			3437	R44	37+000
			3543	R43	37+000
			3998	R42	37+000
50+000	3154	2.755	2521	R6	47+150
			2989	R7	47+150
53+000	2175	2.106	2052	R11	53+300
			2117	R12	53+300
			2148	R14	53+300

Tabla 28. Módulos de testigos de obra y testigos de laboratorio

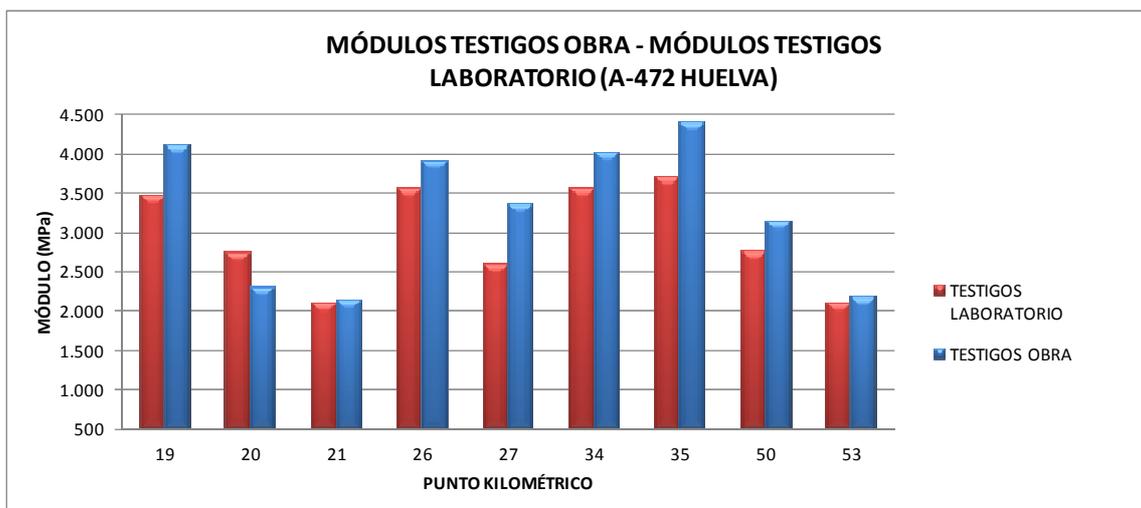


Figura 57. . Módulos laboratorio/obra A-472 Huelva

Como se puede apreciar, los valores de los módulos obtenidos en los testigos de laboratorio y los obtenidos en los testigos de obra son muy parecidos, lo que lleva a la conclusión de que el material reproducido en laboratorio es prácticamente igual al que tenemos puesto en servicio en obra.

A continuación se evalúa la relación entre los módulos obtenidos en testigos de obra y los módulos obtenidos en testigos extraídos de probetas fabricadas en laboratorio mediante una regresión lineal simple. Si se ajusta una línea recta a los diversos pares de valores proporcionados por ambas variables obtenemos la ecuación indicada en la Figura 58.

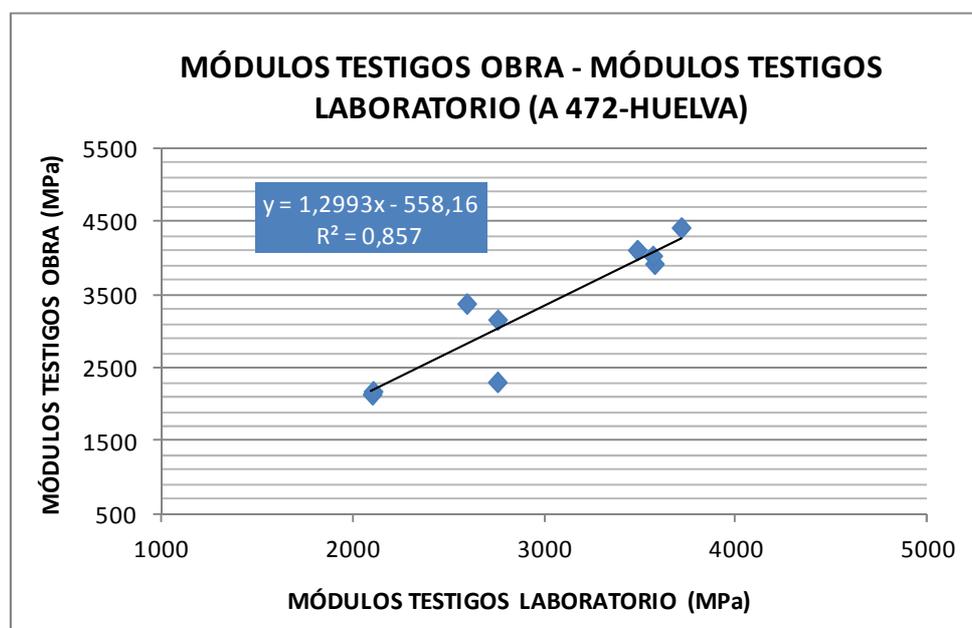


Figura 58. Módulos testigos obra / Módulos testigos laboratorio

El valor de R^2 es alto, 0.857, lo que indica que existe una fuerte relación entre las dos variables estudiadas, y que, para este caso concreto, conociendo los módulos que alcanza el material en laboratorio, se podría estimar los módulos que alcanzaría la mezcla puesta en obra.

4.5.2. TRACCIÓN INDIRECTA

Se han realizado un total de 32 ensayos de tracción indirecta, en testigos de obra y en testigos procedentes de las probetas fabricadas en el laboratorio, con la distribución que se presenta en la Tabla 29.

	TESTIGOS DE LABORATORIO	TESTIGOS DE OBRA	TOTAL MÓDULOS ENSAYADOS
ÉCIJA-OSUNA	5	4	9
HUELVA	18	5	23
TOTAL	23	9	32

Tabla 29. Número de Tracciones Indirectas determinadas

A-351 ÉCIJA-OSUNA

Los testigos la obra A-351 Écija-Osuna, se han ensayado a Tracción Indirecta a 15°C, siguiendo lo establecido en la norma UNE-EN 12697-23, tanto los fabricados en laboratorio con material fresado del pavimento como los extraídos directamente de obra una vez curado el material, y los resultados obtenidos se presentan en la Figuras 60 y 61.

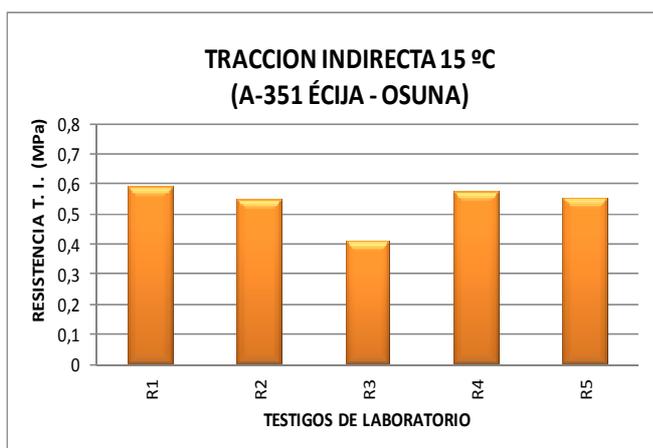


Figura 60. Resistencias T.I. testigos laboratorio

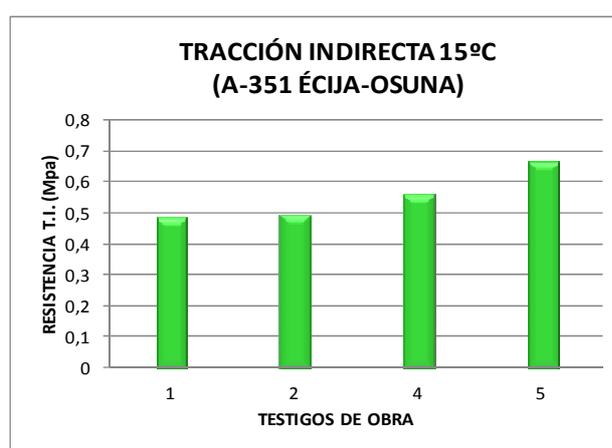


Figura 59. Resistencias T.I. testigos de obra

Se representan los valores de las resistencias a tracción indirecta en función de la densidad. En la Figura 61, se observa que la tendencia que presentan, tanto los testigos de laboratorio como los testigos de obra, es claramente la de aumentar la resistencia al aumentar la densidad, como era de esperar, ya que la resistencia máxima de rotura a tracción indirecta en las mezclas bituminosas, depende, entre otros factores, de la compactación de la mezcla.

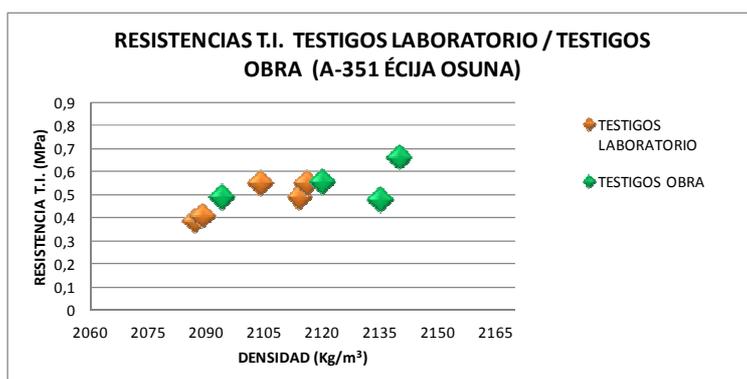


Figura 61. Resistencias T.I. testigos laboratorio y testigos obra frente a su densidad

A-472 HUELVA

De los 23 testigos de laboratorio ensayados, se han realizado tres ensayos de para determinar la susceptibilidad al agua con 4 testigos cada uno de ellos. Los resultados de todos los testigos ensayados se reflejan en las Figuras 63 y 64, separando en una de ellas los ensayos en seco acondicionados al aire a 15°C y en la otra los resultados de los testigos acondicionados en agua.

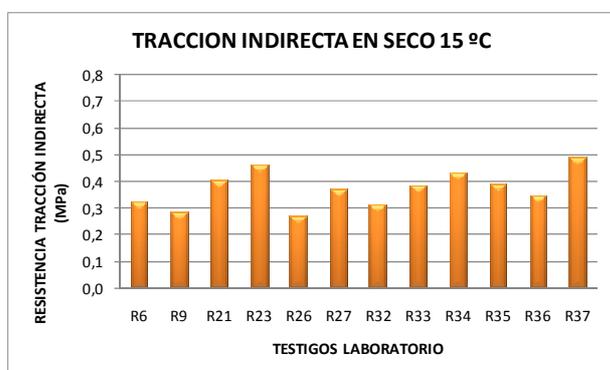


Figura 62. Resistencias a T. I. en seco

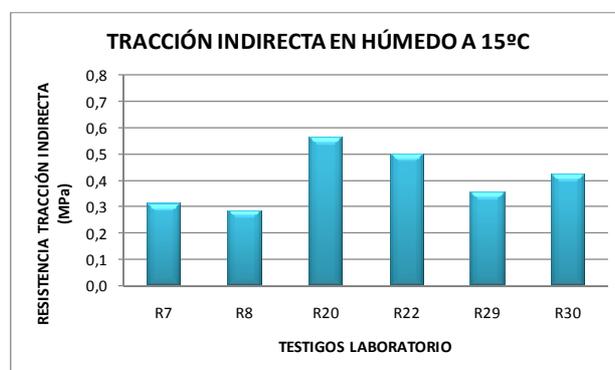


Figura 63. Resistencias a T.I. en húmedo

Los valores obtenidos en las resistencias indirectas son bajos tanto en los testigos de los grupos acondicionados al aire como los obtenidos en los testigos de los grupos acondicionados en húmedo. El valor más alto obtenido es de 0,5891 MPa.

Aún así, relacionando los resultados obtenidos entre los testigos acondicionados en seco y los testigos acondicionados en húmedo, se obtiene un índice de resistencia conservada superior al 75%, que indica que el material ensayado presenta un buen comportamiento frente a la acción del agua.

En la Figura 64 se representa las medias de las resistencias obtenidas, en seco y en húmedo en los testigos extraídos de las probetas nº 2, 7 y 8, que son a los que se les ha aplicado el ensayo de sensibilidad al agua. En la Figura 65 se muestra los resultados de resistencia conservada obtenida en cada uno de los casos

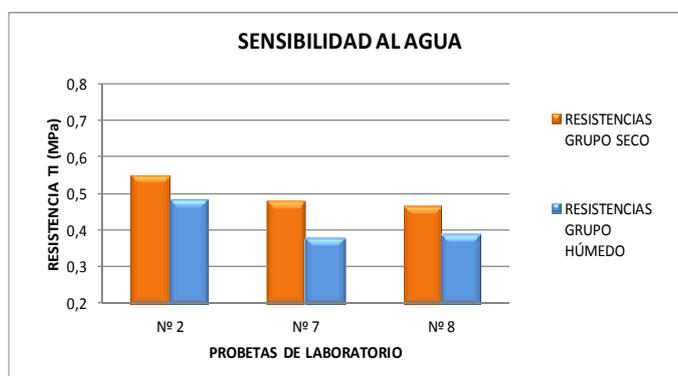


Figura 64. Medias resistencias grupos seco y húmedo

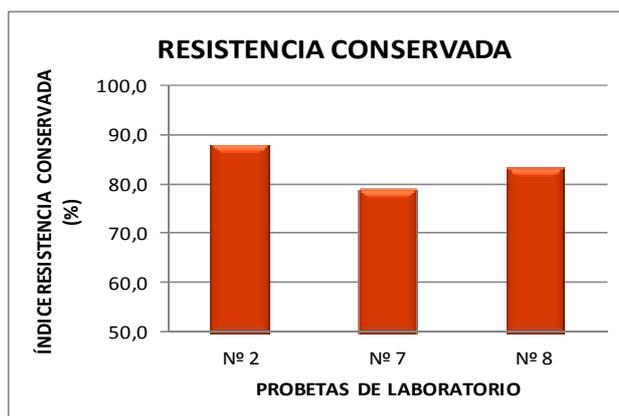


Figura 65. Resultados del ensayo de Sensibilidad al agua

Si se ordenan los valores de resistencia a tracción indirecta obtenidos en todos los testigos en función de la densidad que tienen, se observa claramente, que al aumentar la densidad

aumenta el valor de la resistencia. Esto ocurre en todos los casos, independientemente de cómo haya sido el acondicionamiento de las probetas, como queda reflejado en la Figura 66.

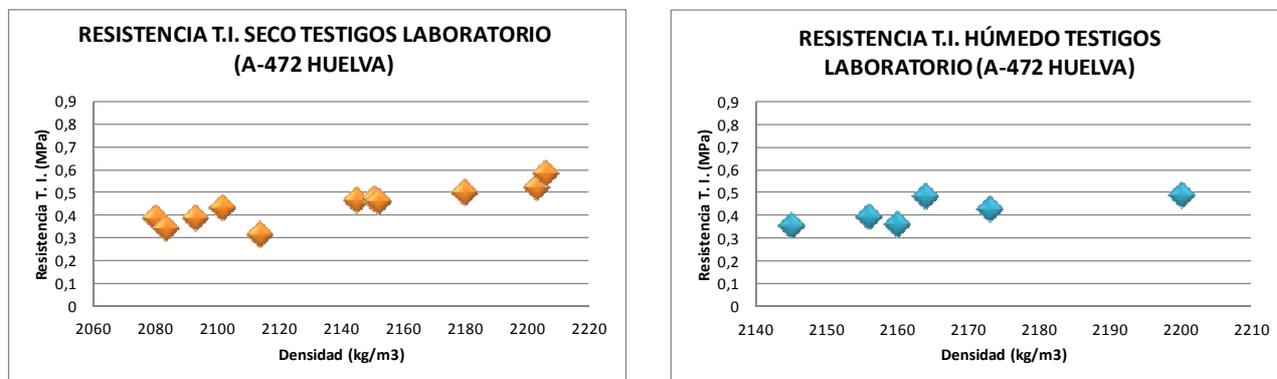


Figura 66. Relación T.I. / Densidad Testigos Laboratorio

En cuanto a los valores de tracciones indirectas obtenidos de los testigos de obra, se puede ver en la Figura 67, que el orden de magnitud de los valores es muy parecido a los resultados obtenidos en los testigos extraídos de las probetas fabricadas en laboratorio; la mayoría de los valores oscilan entre los 0,3 y 0,6 MP.

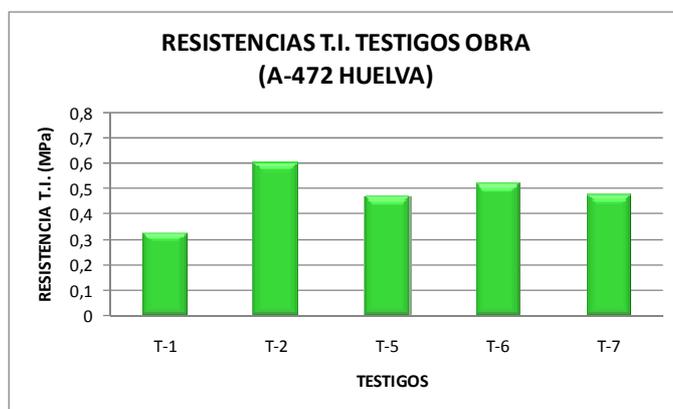


Figura 67. Tracciones Indirectas Testigos Obra

Ordenando los resultados por densidad y representándolos gráficamente (Figura 68), se observa que la tendencia es la misma que en los casos anteriores

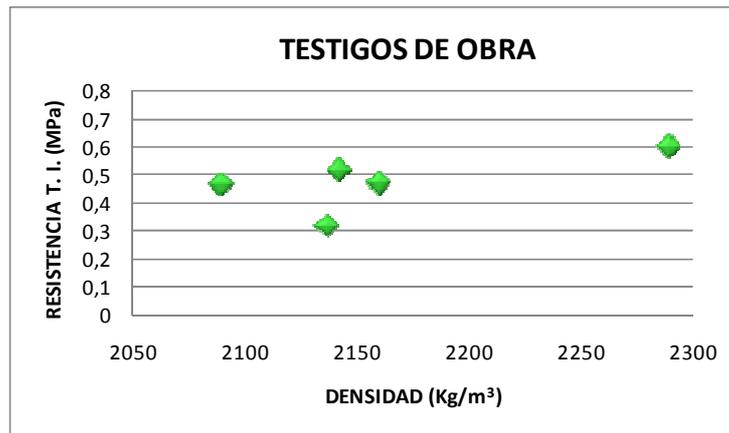


Figura 68. . Relación T.I. / Densidad Testigos Obra

Agrupando los valores por ubicación en la obra y comparando los resultados de obra y de laboratorio, Figura 69, se puede percibir la similitud entre los valores obtenidos.

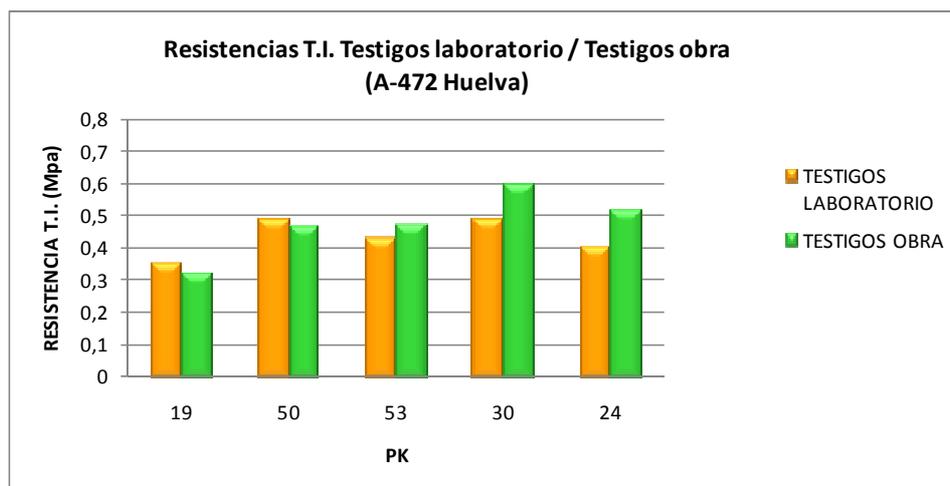


Figura 69. Resistencias T.I. testigos laboratorio / testigos obra

Estudiando la relación entre los valores obtenidos en los dos casos estudiados, se obtiene la ecuación representada en la Figura 70.

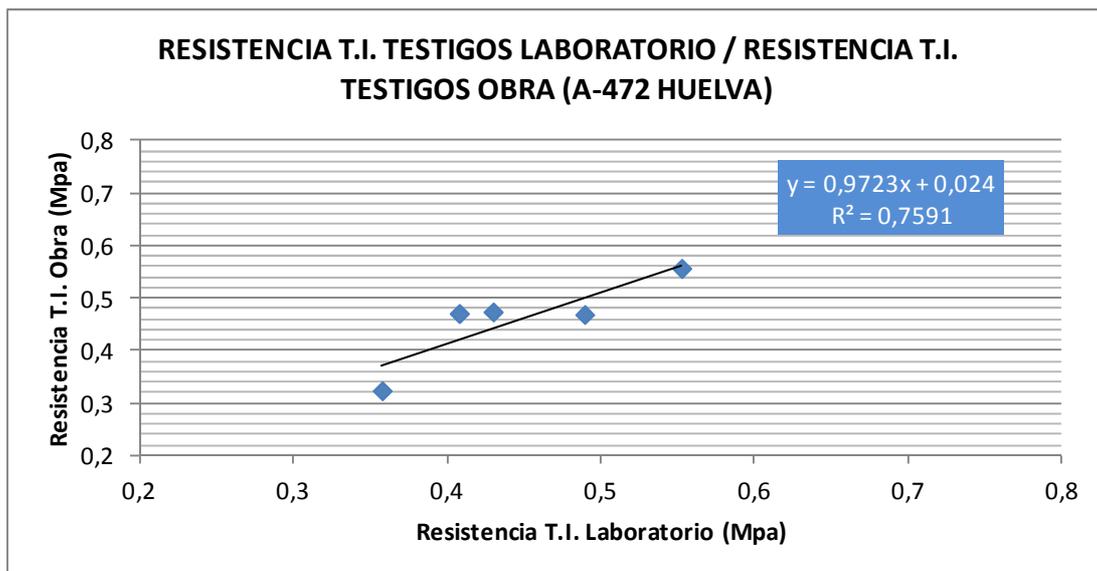


Figura 70. Relación T.I. Testigos laboratorio - T.I. Testigos obra

Si se representa en la misma gráfica (Figura 71) los resultados obtenidos en las resistencias a tracción indirecta en testigos de laboratorio y de obra, frente a su valor de densidad, vemos que la tendencia es la misma tanto en los primeros como en los segundos. Los valores de resistencia también son parecidos.

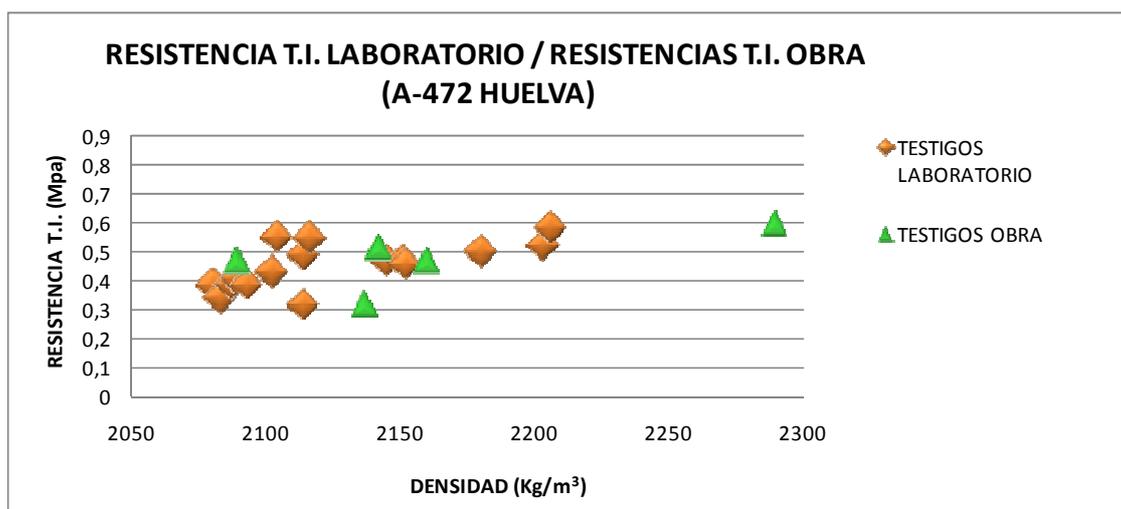


Figura 71. Resistencias T.I. - Densidad en testigos de laboratorio y obra

4.5.3. LEY DE FATIGA. APLICACIÓN PRÁCTICA

Se ha determinado la vida a fatiga del material reciclado en frío mediante el ensayo recogido en la norma UNE-EN 12697-24, Anexo E, en el que las probetas a ensayar son cilíndricas. Como se señaló en la metodología, de esta forma se precisa menos cantidad de material que con los métodos recogidos en los Anexos A y D, en los que las probetas de ensayo son paralelepípedas.

Once testigos extraídos de las probetas fabricadas en laboratorio con el procedimiento de compactación estudiado en la primera fase de esta investigación, se han ensayado a tracción indirecta para determinar su resistencia a la fatiga. Todos estos testigos habían sido extraídos de probetas fabricadas con material procedente de la obra A-472 Huelva.

Cuatro de los resultados obtenidos se tuvieron que desechar, determinando la ley de fatiga del material reciclado a partir de los siete resultados restantes. Esta ley de fatiga, corresponde por tanto al material reciclado que está en servicio. Se ha ensayado un material que tiene alrededor del 100% de la densidad de obra, es decir, que la vida a fatiga determinada en laboratorio se puede equiparar con la vida a fatiga que presentará el firme reciclado en obra. La ley de fatiga determinada, viene dada por la siguiente expresión:

En la Figura 72 se representan los resultados obtenidos, indicando el número de ciclos de carga en el eje de abscisas y la deformación correspondiente en el eje de ordenadas.

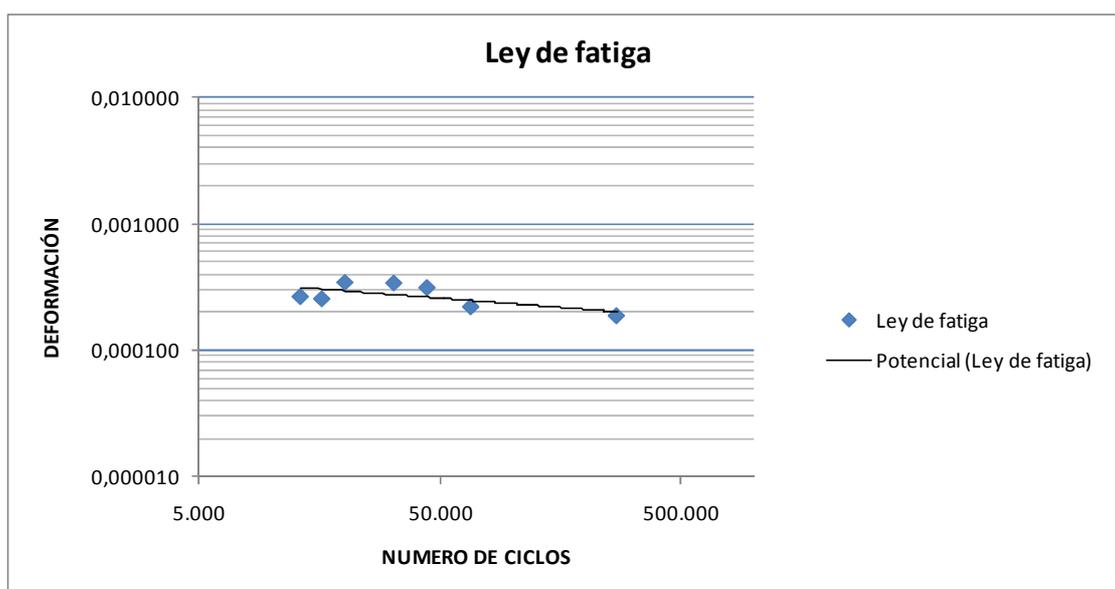


Figura 72. Ley de fatiga material reciclado

La expresión obtenida para la ley de fatiga a partir de los datos de deformación y número de aplicaciones de carga obtenidos en cada una de las probetas ensayadas viene dada por la siguiente expresión:

$$\varepsilon = 0,0013 N^{-0,146}$$

El coeficiente de correlación es de 0,4307. Es un valor bajo, pero teniendo en cuenta la heterogeneidad de este tipo de material, se puede considerar una buena aproximación para la determinación de la vida a fatiga del reciclado. Hay que señalar que esta ley se corresponde con el comportamiento que presentará en obra, ya que se ha fabricado mediante un procedimiento de compactación que reproduce la situación real que se ejecuta en obra.

A continuación y como aplicación práctica de este estudio de fatiga analizamos la vida útil del firme obtenido tras la actuación de reciclado. Éste es el factor más importante a tener en cuenta en la caracterización de un firme, ya que las sollicitaciones a las que se ven sometidas el conjunto de capas asfálticas, por sí solas no provocan el fracaso del material; es la repetición sucesiva de pequeñas cargas con una elevada frecuencia lo que provoca el fallo de un pavimento, debido al desgaste y al agotamiento del mismo.

Los ensayos de fatiga son los encargados de modelizar dichos procesos, viendo para qué número de ciclos repetitivos a deformación constante se produce la rotura del material.

En este último apartado de este trabajo se trata de dar una aplicabilidad a los resultados de fatiga obtenidos en nuestros ensayos. Para ello, y usando el programa de cálculo de deformaciones en firmes ECOROUTE, se establece una comparativa de resultados entre el análisis experimental establecido en este estudio y otro de carácter teórico.

Se trata de ver el número de ciclos que necesita el material para llegar a rotura, introduciendo en el programa ECOROUTE los espesores de las capas intervinientes, e introduciendo el valor del módulo dinámico obtenido en laboratorio como parámetro de cálculo. A continuación, con los datos de deformación extraídos del programa, se entra en la ley de fatiga correspondiente y se ve el número de ciclos para el que se produce el agotamiento, es decir, se puede determinar la vida del firme.

4.5.3.1. Resultados

Para obtener la vida de la capa de reciclado, se ha utilizado un programa que calcula las deformaciones en la fibra inferior de las capas bajo la sollicitación del eje tipo a partir de los espesores y los módulos dinámicos de las diferentes capas del firme. Los espesores de las distintas capas son conocidos, los módulos de las capas superiores e inferiores del firme son los considerados habitualmente en el dimensionamiento de firmes y el módulo

correspondiente a la capa de reciclado es el valor medio determinado en laboratorio en este trabajo de investigación.

A continuación, con las deformaciones calculadas en la capa de reciclado, se entra en la ley de fatiga y se obtienen los ciclos necesarios para la rotura bajo esa sollicitación.

Tras la actuación de reciclado, y como se vio en el apartado de Metodología, el firme final en esta carretera tras la actuación de reciclado estaba compuesto por una capa intermedia de cinco centímetros (5 cm) de espesor de mezcla tipo S-12 y una capa de rodadura de tres centímetros (3 cm) de espesor de mezcla tipo F-10. Esquemáticamente se presenta en la Figura 73 la sección de firme definitivo en la carretera A-472.

Como no se disponía de datos de la sección de firme original, al tratarse de una carretera convencional antigua, se ha considerado una sección A-311 de la Instrucción del 6.1-IC de 1975.

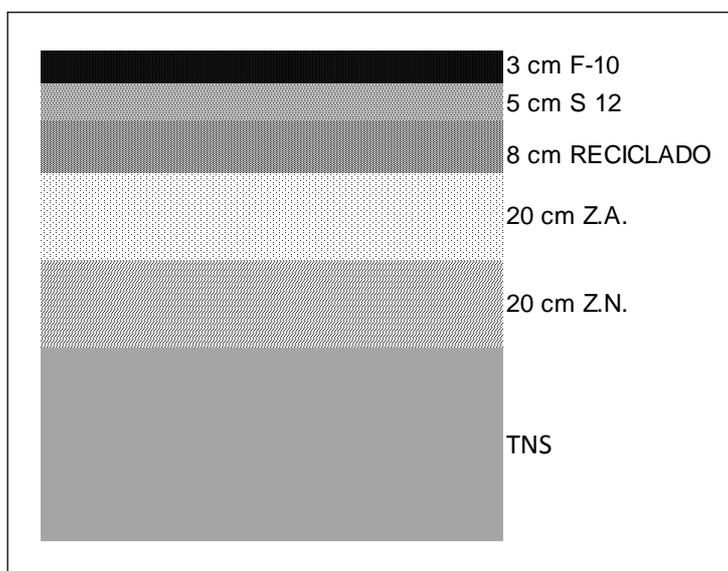


Figura 73. Sección firme definitivo

Los datos introducidos en el programa para cada capa son los siguientes:

1. Capa de rodadura
 - a. Espesor: 3 cm
 - b. Módulo dinámico: 4500 MPa
 - c. Coeficiente de Poisson, ν : 0.35
2. Capa intermedia
 - a. Espesor: 5 cm

- b. Módulo dinámico: 6000 MPa
 - c. Coeficiente de Poisson, ν : 0.35
3. Capa de reciclado
- a. Espesor: 8 cm
 - b. Módulo dinámico: 3000 MPa
 - c. Coeficiente de Poisson, ν : 0.35
4. Capa de Zahorra Artificial
- a. Espesor: 20 cm
 - b. Módulo dinámico: 450 MPa
 - c. Coeficiente de Poisson, ν : 0.30
5. Subbase granular: Zahorra natural
- a. Espesor: 20 cm
 - b. Módulo dinámico: 150 MPa
 - c. Coeficiente de Poisson, ν : 0.30
6. Explanada
- a. Espesor: Indefinido
 - b. Módulo dinámico: 50 MPa
 - c. Coeficiente de Poisson, ν : 0.40

En un primer cálculo se ha considerado la adherencia total entre capas, obteniendo un resultado de deformación tangencial para la capa de reciclado de $\varepsilon = -1,74 \cdot 10^{-4}$. Para determinar la vida útil del material reciclado, utilizamos la expresión de la ley de fatiga definida, como hemos dicho anteriormente, en laboratorio para este material mediante el ensayo de tracción indirecta y que viene dada por:

$$\varepsilon = 0,0013 N^{-0,146}$$

Despejando el número de ciclos de carga para el valor de deformación que hemos definido, se obtiene un valor de 960.000, que serían el número de ejes que soportaría nuestro material antes de agotarse. Este número de ejes, corresponde a un tráfico T2 según la Instrucción mencionada 6.1-IC de 1975.

Se comprueba, a continuación, la categoría de tráfico que correspondería a este número de ejes calculado según la instrucción vigente actual, 6.1-IC de 2003.

El número de ejes equivalentes de 13 t (tráfico de proyecto, TP) viene dado por la siguiente expresión:

$$TP = IMD_{PA} \times CE \times 365 \times F \times \gamma_t$$

Donde,

IMD_{PA} : Intensidad Media Diaria de vehículos pesados

CE: Coeficiente de equivalencia

F: Factor de crecimiento

γ_t : Coeficiente de seguridad en cargas

En este caso se comprueba la IMD_{PA} a partir del número de ejes equivalentes calculado.

Se toma un coeficiente de equivalencia, CE, de 0,6 de acuerdo con lo indicado en el apartado 3.1.1. de la norma 6.1.-IC "Sección de Firmes", al no disponer del espectro de distribución de ejes por intervalos de carga correspondiente a esta carretera.

El factor de crecimiento F, se determina mediante la expresión:

$$F = \frac{(1 + r)^n - 1}{r}$$

Donde,

n = Vida de proyecto

r = Tasa de crecimiento

Con los datos facilitados por la gerencia de obra (n=10 y r=5%) obtenemos un valor de F de 12,578.

El coeficiente γ_t es un coeficiente de mayoración de cargas que para un tráfico T3 es de 1,1.

Con todos estos datos se determina que la Intensidad Media Diaria de vehículos pesados es de 317 que corresponde con un tráfico T2, como se puede apreciar en la tabla de Categorías de Tráfico recogida en la norma 6.1- IC "Secciones de Firme" de la Instrucción de Carreteras (Ministerio de Fomento, 2003b)

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	T00	T0	T1	T2	T31	T32	T41	T42
IMD p (vehículos pesados / día)	≥ 4000	<4000 ≥2000	<2000 ≥800	<800 ≥200	<200 ≥100	<100 ≥50	<50 ≥25	<25

Tabla 30. Categorías de tráfico pesado

Esta carretera tiene sin embargo, un tráfico T31, así que se puede afirmar que el diseño cumple con creces las especificaciones necesarias, y que el dimensionamiento es correcto (incluso excesivo), teniendo en cuenta la vida a fatiga del material reciclado que hemos estudiado en laboratorio.

Si no se considerara la adherencia entre las capas, el valor de la deformación tangencial en la fibra inferior del reciclado sería $\varepsilon = -3,51 \cdot 10^{-4}$. Si se utiliza este dato para determinar el número de ciclos con el que se agota el material reciclado a partir de la ley de fatiga determinada en laboratorio se obtiene un número de ciclos de 7850, que correspondería a un tráfico ligero según la Instrucción derogada. Con este valor y haciendo el mismo cálculo que se ha realizado anteriormente para actualizarlo, el tráfico que podría soportar el material antes de agotarse sería mucho menor, correspondiendo a una categoría T4.

Si se considera una situación de adherencia parcial, con un número equivalente de ejes de 13 toneladas promedio entre el primer caso en el que las capas estaban adheridas y el segundo caso en el que no se considera adherencia entre capas, se realizarían los cálculos con un valor de $N = 483.925$. Este valor, en la norma 6.1-IC del año 1975 estaría incluido en un tráfico T3 (80.000 a 800.000 ejes).

Si se actualiza a la normativa vigente, se obtendría una $IMD_{PA} = 160$, que como se puede observar de nuevo en la tabla de las categorías de tráfico corresponde a un tráfico T31, con lo que se podría volver a decir, que para el caso de adherencia parcial (condiciones más realistas), la sección estaría bien dimensionada

5 CONCLUSIONES

5 CONCLUSIONES

En este capítulo se exponen las conclusiones alcanzadas en base a los trabajos realizados en esta investigación.

La conservación de firmes es una actuación necesaria para garantizar las características iniciales que debe presentar una carretera y asegurar una conducción cómoda y segura para el usuario. Esta conservación de carreteras se realiza tradicionalmente mediante fresado y reposición con mezcla bituminosa de nueva fabricación. Esta práctica genera un volumen de residuos inertes que en muchos países, debido a las restricciones de tipo medioambiental y a la falta de espacio, suponían un serio problema. Las técnicas de reciclado de firmes se convierten entonces en la solución a este problema. La reutilización del material fresado de las carreteras deterioradas elimina el problema del vertido de residuos con el añadido de obtener ventajas medioambientales en lo referente a extracción y utilización de áridos vírgenes.

Tras el estudio bibliográfico realizado en este trabajo se ha comprobado que se han llevado a cabo diversos proyectos de investigación para el desarrollo de diferentes técnicas que permitan el reciclado de los materiales utilizados en la construcción de carreteras, en especial de las capas de pavimento, por ser las más costosas y las que contienen los materiales de mejor calidad dentro del firme. Se está potenciando el reciclado de pavimentos, en algunos casos por análisis de costos o por acuerdos y normativas europeas que pretenden que se reciclen todos los materiales potencialmente reciclables (políticas de gestión de residuos con el lema *residuo cero*). Se ha detectado una creciente inversión en el desarrollo de equipos y técnicas sostenibles en materias relacionadas con reutilización de materiales de construcción, y en concreto de materiales procedentes de firmes bituminosos deteriorados.

En España se empiezan a utilizar las técnicas de reciclado in situ en frío en los años noventa, sin regulaciones ni prescripciones que señalen las características a exigir. A partir de la aparición en el año 2002 de normativa y soporte técnico, tras la verificación de los buenos resultados obtenidos en numerosas actuaciones previas, los reciclados entran a formar parte de las técnicas de rehabilitación y conservación de carreteras.

Teniendo en cuenta las ventajas que presenta el reciclado in situ en frío con emulsión bituminosa y dado que en España, y más concretamente en Andalucía se cuenta con un elevado número de horas de radiación solar y el clima es propicio para técnicas de reciclado en frío, se procedió a investigar la tecnología de reciclado in situ en frío con emulsión. Tras analizar el estado del arte se detectaron ciertas carencias en la técnica que se intentan solventar en este trabajo de investigación. Se define como objetivo principal reproducir en laboratorio, un material reciclado de las mismas características que el ejecutado en obra.

Para alcanzar este fin se ha estudiado un procedimiento de compactación con el compactador de segmentos de rodillo que permita fabricar probetas de material reciclado con densidades iguales a las alcanzadas en obra.

El primer punto tratado ha sido el estudio de un nuevo método de medida de densidad en obra. Se ha intentado determinar la densidad y la humedad in situ con el equipo no nuclear conocido como PQI (Pavement Quality Indicator). De esta manera, se perseguía poder conocer la evolución con el tiempo del valor de la densidad y humedad del material, obviando la necesidad de recurrir a procedimientos destructivos, como la extracción de testigos para el control de la mezcla. Se ha realizado un estudio exhaustivo con los distintos métodos de medida de densidad existentes sobre una mezcla fabricada con emulsión, y se ha intentado correlacionar los valores medidos con el equipo no nuclear y los valores reales determinados sobre testigos en laboratorio. Con los resultados obtenidos, se llega a la conclusión de que con este equipo se puede comprobar el grado de maduración de la emulsión y realizar un seguimiento al contenido de humedad del material reciclado, pero no se ha podido establecer una relación directa entre las medidas de densidad realizadas con el equipo no nuclear y las medidas determinadas en laboratorio. Los valores de humedad proporcionados por el equipo no se ajustan a los reales y por ende, el cálculo de la densidad es erróneo. Se podría plantear un estudio más profundo para poder determinar factores de corrección de la humedad de manera que pueda ser utilizado en mezclas fabricadas con emulsión al igual que se utiliza en mezclas convencionales en caliente.

En cuanto al estudio del procedimiento de compactación en laboratorio, se evidencia que con otros métodos de compactación se obtienen valores de densidad más cercanos a los obtenidos en obra que mediante la compresión estática indicada en el ensayo de Inmersión-Compresión utilizado para el diseño de estas mezclas. Con esta última compactación, los valores de densidad son muy elevados, superiores siempre a los obtenidos en la ejecución del reciclado, mientras que los valores obtenidos con el equipo utilizado en esta investigación, el compactador de segmentos de rodillo, se han podido obtener valores similares a los de obra. Partiendo de un programa de compactación utilizado para mezclas bituminosas en caliente, se ha llegado a otro adaptado para mezclas recicladas reduciendo levemente la carga de aplicación en los pasos intermedios del proceso de compactación. Concretamente, tras varios programas estudiados, se ha determinado como el definitivo aquel en el que se redujo la carga de compactación en el paso número once de 19,5 kN a 18,5 kN, y en el paso número trece de 25,5 kN a 24,2 kN. Se ha conseguido reproducir en laboratorio un material de densidad muy similar a la obtenida en obra con la técnica de reciclado en frío in situ, con porcentajes de compactación en laboratorio del 98%-102% de la densidad de obra. Este material ha sido elaborado en forma de probeta paralelepípeda que ha permitido extraer testigos para ser ensayados y comparar los resultados con los ensayos realizados sobre testigos extraídos directamente de obra.

Los ensayos analizados han sido módulos y tracción indirecta. Los valores de los módulos obtenidos en los testigos extraídos de las probetas fabricadas en laboratorio están comprendidos entre 2.000 y 4.000 MPa. Los fabricados con material de la obra A-351 Écija-Osuna están por encima de 2.000 pero en ningún caso sobrepasan los 3.000 MPa. Estos resultados son muy acordes a los obtenidos en los testigos de obra, que oscilan entre 2.500 MPa y 3.200 MPa. Los módulos de los testigos fabricados con el material de la obra A-472 Huelva están en su mayoría por encima de los 2.500 MPa; quince de los veinticuatro módulos determinados están alrededor ó por encima de los 3.000 MPa, lo que indica que el material reciclado va a presentar un buen comportamiento estructural. Los módulos obtenidos en los testigos de la obra A-472 Huelva se mueven en un rango similar, de hecho, mediante un análisis de regresión lineal simple entre los valores de los módulos obtenidos en testigos de laboratorio y los valores de los módulos obtenidos en testigos de obra, se ha obtenido un valor del coeficiente de correlación, R^2 , de 0,857, que indica que existe sólida relación entre ambas variables (módulos de los testigos de laboratorio y módulos de los testigos de obra). Es decir, que mediante el estudio de los módulos del material reciclado en laboratorio se podría predecir el valor del módulo que alcanzaría el reciclado en obra.

La similitud entre los valores de los módulos obtenidos en los testigos de laboratorio y los módulos obtenidos en testigos de obra, corrobora que el procedimiento de compactación reproduce con bastante fidelidad el material reciclado.

Los valores de resistencia a tracción indirecta de los testigos extraídos de probetas fabricadas en laboratorio oscilan entre 0,3 y 0,6 Mpa, valores de similar magnitud a los obtenidos en los testigos procedentes de obra. Se ha verificado que, tanto en los testigos fabricados en laboratorio como en los testigos de obra, las resistencias a tracción indirecta son mayores al aumentar la densidad de los testigos.

Estos resultados indican que el material fabricado en laboratorio responde de igual manera que el material fabricado en obra ante el ensayo de tracción indirecta, lo que se traduce en una buena reproducción en laboratorio de la ejecución de obra.

Se ha realizado una regresión lineal simple entre los valores de las resistencias a tracción indirecta de testigos de laboratorio y de testigos de obra procedentes todos de la A-472 Huelva y se ha obtenido un coeficiente de correlación de 0,7591, por lo que se puede afirmar que existe relación significativa entre ambos resultados.

El valor del índice de resistencia conservada ha sido alto en los casos estudiados. Aunque han sido pocas las pruebas realizadas para el estudio de la susceptibilidad al agua, se observa que las resistencias a tracción indirecta no presentan mucha variación entre las obtenidas en el grupo seco y las obtenidas en el grupo húmedo.

Se ha determinado la ley de fatiga del material reciclado procedente de la obra A-472 Huelva, mediante el ensayo recogido en la norma UNE-EN 12697-24, Anexo E sobre testigos

cilíndricos extraídos de las probetas fabricadas en laboratorio. Con los testigos de laboratorio disponibles para la realización de estos últimos ensayos, se ha llegado a una ley de fatiga con un coeficiente de correlación de 0,4307, que, aunque es un valor bajo, dada la singularidad de los materiales reciclados se puede considerar una buena aproximación.

Como aplicación práctica se ha analizado la vida útil del firme obtenido tras el reciclado. Se han calculado las deformaciones en las fibras inferiores de cada capa del firme con el programa ECOROUTE, y una vez determinada la correspondiente a la capa de reciclado, se ha introducido el valor de esa deformación en la expresión de la ley de fatiga establecida mediante los ensayos de laboratorio.

Los parámetros de partida para el cálculo de estas deformaciones son el espesor de la capa y el módulo. El módulo de la capa de reciclado introducido en el programa, ha sido el valor real del módulo del material determinado en laboratorio en la fase anterior de este estudio.

El resultado obtenido en el caso de considerar adherencia total entre las capas, revela que el firme construido soportaría un número de ejes equivalentes de 960.000, valor que corresponde a un tráfico de categoría T2, según la instrucción 6.1- IC de 1975, que es la que se ha utilizado para definir el paquete de firmes. Si utilizando los coeficientes de equivalencia y seguridad y aplicando el factor de crecimiento determinado en la instrucción 6.1-IC vigente actual, se determina el valor de la Intensidad Media Diaria de tráfico pesado, que es el valor con el que se define la categoría de tráfico pesado en esta instrucción se obtiene un valor de 317, incluido en la horquilla de Intensidades Medias Diarias para un tráfico pesado T2.

El tráfico que tiene la carretera es un T31, así que va a soportar una Intensidad Media Diaria de menor categoría que la que es capaz de soportar. El firme obtenido con la técnica de reciclado está dimensionado adecuadamente para el tráfico que va a soportar, se podría decir incluso que sobredimensionado.

Se ha estudiado también el caso de no considerar la adherencia entre capas, con lo que el valor de la deformación en la fibra inferior de la capa de reciclado ha variado, y el número de ejes calculado ha disminuido considerablemente, obteniendo una categoría de tráfico pesado ligero según la antigua Instrucción y una categoría de tráfico T4 según la Instrucción actual. Estas categorías de tráfico son inferiores a la que realmente tiene la carretera.

Estudiando la situación hipotética de que hubiese adherencia parcial, se obtiene un número de ciclos de carga de 483.925 que corresponde con un tráfico T3 de la Instrucción del año 75 y un tráfico T31 para la Instrucción actual. Es decir, que la aplicación del estudio de la vida a fatiga del material reciclado indica que se ha realizado un buen dimensionamiento para el caso intermedio (y más realista) de adherencia parcial entre capas.

Como resumen de lo anteriormente expuesto se pueden enumerar las siguientes conclusiones finales derivadas de este trabajo de investigación:

1. Las actuaciones de rehabilitación de carreteras generan un residuo, el firme fresado, que tiene un elevado poder de reutilización y que como cualquier residuo tiene que ser gestionado para minimizar el impacto medioambiental que pueda producir. Las técnicas de reciclado de firmes solventan este problema, en especial la técnica del reciclado in situ en frío en la que se utiliza el 100% del material degradado.
2. Tras el estudio bibliográfico realizado se ha puesto de manifiesto la necesidad de seguir investigando en la técnica de reciclado in situ en frío con emulsión, ya que presenta numerosas ventajas de distinta índole y ha de ser impulsada para incrementar su utilización como alternativa a otras técnicas de rehabilitaciones de firmes.
3. Las mezclas fabricadas con emulsión bituminosa, son complejas tanto en su formulación como en su puesta en obra, debido al proceso de maduración que experimentan cuando la emulsión, por efecto de la evaporación o por reacción química al entrar en contacto con los áridos empieza a perder el agua. Este hecho hace que las mezclas experimenten un proceso de densificación con el paso del tiempo debido a la disminución de la humedad de la mezcla y a la acción de compactación que hace el tráfico. Esta evolución de la densidad en obra es difícil de controlar. Se ha estudiado el uso del equipo no nuclear PQI (Pavement Quality Indicator) pero la presencia de agua en un equipo basado en impedancia eléctrica hace que no se obtengan valores reales de los parámetros que mide, densidad y humedad. Tras el estudio realizado en este trabajo se plantea la necesidad de profundizar para poder establecer factores de corrección de la humedad medida que permitan calcular de forma precisa la densidad del material.
4. El ensayo de laboratorio utilizado para definir la fórmula de trabajo de la mezcla reciclada en frío, el ensayo de Inmersión-Compresión recogido en la NLT-162, proporciona unos valores de densidad muy superiores a los alcanzados en obra. El procedimiento de compactación utilizado para la fabricación de las probetas indicado en este ensayo no parece el más idóneo para este tipo de mezclas.
5. El estudio de distintos programas de compactación con el compactador de segmentos de rodillo ha permitido establecer un procedimiento de compactación de material reciclado en frío con emulsión bituminosa que permite reproducir el material ejecutado en obra con fidelidad. A partir del procedimiento utilizado para mezclas bituminosas convencionales y reduciendo levemente la carga aplicada se ha determinado uno específico para este tipo de material con el que se consiguen densidades menores que las alcanzadas en el ensayo de Inmersión-Compresión y más parecidas a las alcanzadas en obra.
6. El material reproducido con el nuevo procedimiento de compactación en laboratorio definido ha presentado unos resultados frente a los ensayos de resistencia a tracción

indirecta y determinación de módulos dinámicos muy similares a los resultados obtenidos en los testigos extraídos directamente de obra. Este hecho pone de manifiesto que el procedimiento de compactación definido en esta investigación es adecuado para este tipo de material.

7. Se ha establecido una ley de fatiga real del reciclado a partir de la mezcla reproducida en laboratorio, mediante el ensayo basado en tracción indirecta, sobre probetas cilíndricas. Analizando la vida útil del firme obtenido tras el reciclado, como aplicación práctica al estudio de fatiga, se concluye que el dimensionamiento ha sido correcto para el tráfico que soporta la carretera.

Para terminar, destacar la importancia de reproducir en laboratorio con fidelidad el material ejecutado en obra para poder analizar su respuesta frente a ensayos de caracterización y poder estimar el comportamiento que presentará in situ cuando entre en servicio.

Se ha observado, que, en las actuaciones de reciclado analizadas en esta investigación, la respuesta del material no es inferior a la que pueda presentar una mezcla convencional equivalente en una capa intermedia o de base. Al tener el añadido de ser una técnica que comporta beneficios ambientales y económicos se considera que ha de ser impulsada y que no deben cesar los esfuerzos entre empresas privadas, administraciones y centros de investigación para fomentar su desarrollo y utilización.

5 CONCLUSIONS

This chapter presents the conclusions of this research study. The conservation of road pavement surfaces is an initiative that should guarantee the optimal properties of a road surface as well as comfortable and safe driving conditions for users. The conservation of highways is generally carried out by milling and replacing the pavement with a newly manufactured bituminous mix. However, this practice generates large quantities of inert waste that are a serious problem in many countries with strict environmental regulations and lack of landfill space. Pavement recycling techniques are thus a solution to this problem. The reuse of milled material from deteriorated roads eliminates the need to find new land areas for waste deposit. Furthermore, these techniques are also more environmentally friendly since they eliminate the need to extract and use virgin aggregate.

After reviewing the relevant literature on this topic, it was found that various research projects had been carried out to develop new techniques for the recycling of road construction materials. This is especially true for pavement layers since from a purely economic perspective, the high-quality materials in the road surface course are the most expensive. Pavement recycling is being fomented in some cases by cost analyses as well as by European agreements, and regulations. Generally speaking, such directives affirm that all potentially reusable materials should be recycled (zero waste policies). In a parallel way, there is a rising investment in the development of equipment, devices, and sustainable techniques for the reuse of construction waste material, and, more specifically, material from deteriorated bituminous pavement surfaces.

In Spain, the use of in-place recycling techniques began in the 1990s though there were no national regulations or norms that specified the characteristics of the procedures to be followed. In 2002, after verifying the positive results obtained in road construction projects using reclaimed asphalt pavement (RAP), government regulations and technical support were enacted and published. It was at that time when recycling was officially recognized as a highway conservation and pavement rehabilitation technique.

Evidently, cold in-place recycling (CIR) with bituminous emulsion has many advantages. Furthermore, in Spain, and especially in Andalusia, there are many hours of solar radiation throughout the year and the climate is favourable for CIR. For this reason, we made this technology the object of our study. Nonetheless, our analysis of the state of the art brought to light certain flaws in this procedure that, in our opinion, could be remedied. Our main objective was to reproduce in the laboratory material of the same characteristics as that manufactured in actual working conditions. This was done by designing test specimens of recycled material with the same density as that found at the road construction site.

Our initial starting point was the study of a new method of measuring density at the work site. Density and moisture were thus determined on-site with a non-nuclear device known as a PQI (Pavement Quality Indicator). It was our intention to study the evolution of the density and moisture levels of the RAP without resorting to destructive procedures such as extracting pavement cores to monitor the mix. An in-depth study was thus performed of the different methods used to measure the density of a bitumen emulsion mix. The values obtained with the PQI and the actual values obtained for the laboratory specimens were then compared. The results indicated that the PQI was able to verify the degree of maturation of the emulsion and monitor the moisture content of the recycled material. However, it was not possible to establish a direct relation between the density values obtained with the non-nuclear device and those calculated in the laboratory. Since the moisture values provided by the device did not correspond to the real values, the calculation of the density was erroneous. It was thus concluded that a more exhaustive study should be carried out to determine moisture correction factors so that this device can be used for cold emulsion mixes in the same way as it is used for conventional hot asphalt mixes.

Regarding the laboratory compaction procedure, it was found that other compaction methods gave density values that were closer to those at the worksite than the values obtained by means of the Immersion-Compression test, which is the method generally used for mix design. In fact, the Immersion-Compression test gave density values that were considerably higher than those obtained in the actual recycling process. In contrast, the values obtained with a roller sector compactor, the device used in this research study, were similar to those at the work site.

Based on the same compaction program used for hot bituminous mixes, we created another process that is better adapted to recycled mixes. This was done by reducing the application load in the intermediate steps of the compaction process. More specifically, after testing various programs, it was determined that the most effective was the one in which the compaction load was reduced in pass 11 (from 19.5 to 18.5) and in pass 13 (from 25.5 kN to 24.2 kN). In this way, the material reproduced in the laboratory had a density that was similar to that obtained at the work site with the in-place cold recycling technique. More specifically, the laboratory compaction percentages were 98-102% of the density at the worksite. The material was elaborated in the form of parallelepiped specimens from which core samples were extracted for the tests. The results obtained were then compared to the results of pavement cores from the work site.

The modulus and indirect tensile strength of the samples were tested. The modulus values obtained for the laboratory specimen cores were 2000-4000 MPa. The values of the specimens, which were manufactured with material from the A-351 Écija-Osuna road construction project, were found to be higher than 2000 Mpa though none exceeded 3000 MPa. These results are in consonance with those of the pavement cores extracted at the

worksite, which range from 2500 MPa to 3200 MPa. The moduli of the cores extracted from laboratory specimens manufactured with material from the A-472 Huelva road construction project were mostly higher than 2500 MPa. In this respect, 15 of the 25 moduli approximated or were even greater than 3000 MPa. This shows that the potentially optimal structural performance of the recycled material. The modulus values obtained for the cores from the A-472 Huelva road construction project were found to have a similar range. This is reflected in a simple linear regression of the modulus values calculated from cores extracted from laboratory specimens and those from the worksite cores.

In this analysis, the correlation coefficient (R^2) was 0.857, which indicates a solid relation between both variables (moduli of the laboratory specimens and moduli of the pavement cores from the road construction project). This is clear evidence that it is possible to estimate the modulus value of the on-site mix, based on laboratory values. The similarity between the modulus values of the laboratory pavement cores and the work site cores confirms that the compaction procedure is an accurate reproduction of the recycled material.

The indirect tensile strength of the cores extracted from laboratory specimens was 0.3-0.6 MPa, which was similar to that obtained for the worksite pavement cores. Our study found that in the laboratory test samples as well as in the actual worksite samples, the indirect tensile strength values were greater since both types of sample had a higher density. These results for the indirect tensile strength test indicate that the response of the laboratory-manufactured material was similar to that of the actual road construction material. This signifies that the laboratory test specimens accurately reproduced the pavement at the work site.

A simple linear regression was performed for the indirect tensile strength values of the laboratory core samples and the on-site core samples, both of which were composed of material from the A-472 Huelva road construction project. The correlation coefficient obtained was 0.7591, which means that there is a significant relation between these results.

In both case, the retained strength index was high. Although few moisture susceptibility tests have been performed, it was observed that there was only a very slight variation between the indirect tensile strength values of the set of wet specimens and the set of dry specimens.

Our study also used the test specified in Annex E of the UNE-EN 12697-24 standard to determine fatigue life of the recycled material from the A-472 Huelva road construction site, based on the cores extracted from the laboratory specimens. Fatigue line was found to have a correlation coefficient of 0.4307. Despite the fact that this value is fairly low, given the singular characteristics of the recycled material, it can be regarded as a good approximation.

As a practical application, we analyzed the useful life of the RAP road surface course. The ECOROUTE program was used to calculate the deformations in the bottom section of each pavement layer. Once the deformation of the recycled pavement layer was calculated, the value of this deformation was included in the fatigue life equation that had been determined by the laboratory tests. The initial parameters for the calculation of these deformations were the thickness of the layer and the modulus. The modulus of the recycled layer in the program was the actual value of the modulus of the laboratory material that had been determined in the previous phase of the research study. When the total adhesion between layers was considered, the results revealed that the pavement surface was capable of supporting a number of equal axes of 960,000. This value corresponds to a category T2 heavy traffic load, as specified in Directive 6.1-IC (1975), which is used to define pavements. When the safety and equivalence coefficients are used and the growth factor in 6.1- IC (the directive currently in force) is applied, this gives the average daily heavy traffic value. The value thus obtained was 317, which is within the range of average daily traffic values for category T2 heavy traffic loads.

Since the normal traffic load for this road is category T31, the road will presumably be able to sustain a heavier traffic load than actually required. The pavement obtained with this recycling technique is thus more than adequate for the predicted traffic load. In fact, it could even be over-dimensioned

Also studied was the case in which the adhesion between layers is not considered. In that case, there was a variation in the value of the deformation at the bottom of the RAP layer, and the number of axes decreased considerably. This corresponded to a category T4 light traffic load, according to Directive 6.1-IC. These traffic load categories were lighter than those actually sustained by the road.

In the hypothetical situation of partial adhesion, the number of load cycles would be 483,925, which corresponds to a category T3 traffic load in the 1975 directive and a T31 load in the current directive. In other words, the analysis of the fatigue life of the RAP indicates that it is well dimensioned for the intermediate (and most realistic) case of partial adhesion between layers.

As a summary, the following conclusions can be derived from this research study:

8. Road rehabilitation initiatives inevitably generate waste consisting of milled pavement. This waste can be reused, and in the same way as any other type of waste, should be effectively managed in order to minimize its potential environmental impact. Pavement recycling techniques are a good way of solving this problem, especially the technique of cold in-place recycling, which uses 100% of the milled material.

9. A review of the relevant literature shows the need to carry out further research on cold in-place recycling with bitumen emulsion since this technique has numerous advantages. Its use should thus be encouraged as an alternative to other pavement rehabilitation techniques.
10. Bituminous emulsion mixes are very complex in their design as well as their application at the work-site. The reason for this complexity lies in the maturation process that occurs when the emulsion, either because of evaporation or chemical reaction, enters in contact with the aggregate when it begins to lose moisture. This causes the mixes to increase in density over time. This density increase is due to moisture loss as well as the compaction produced by the traffic load. The evolution of pavement density at the worksite is not easy to monitor. For this purpose, we studied the possible use of a non-nuclear device known as the PQI (Pavement Quality Indicator). However, it was found that the presence of moisture in a device based on electrical impedance made it impossible to obtain real moisture and density values. The results obtained reflected the need for a more in-depth study with a view to establishing moisture correction factors, which would allow a more precise calculation of the density of the material.
11. The Immersion-Compression test, as specified in the NLT-162, which is used to define the job mix formula of the cold recycled mix, provides density values that are higher than those obtained at the road construction site. The compaction procedure used to manufacture the laboratory test specimens was found not to be the most suitable for this type of mix.
12. The study of different compaction programs with a roller sector compactor defined an effective compaction procedure for cold recycled material with bituminous emulsion that faithfully reproduces the material used at the worksite. Based on the same procedure used for conventional hot bituminous mixes, though with a slight reduction of the applied load, a specific compaction program was created especially for this type of material. Not only did this new program make it possible to obtain lower densities than those obtained with the Immersion-Compression test, but also to produce material with densities that were very similar to those obtained at the road construction site.
13. When the indirect tensile strength and the dynamic moduli of the material produced with this new compaction procedure were calculated, the results obtained were very close to those for the pavement cores extracted at the work site. This is clear evidence that the compaction procedure defined in this research is appropriate for this type of material.
14. The laboratory mix was used to establish a real fatigue law for the recycled material by means of the indirect tensile strength test on the test specimens. As a practical

study of pavement fatigue, the useful life of the pavement was then analyzed after the recycling process. The results showed that the dimensioning was correct for the traffic load supported by the road.

In conclusion, this study highlights the importance of precisely reproducing the material used at the worksite in order to accurately analyze its response to tests that characterize its properties, and to thus be able to estimate its on-site performance when the road is in service. It was observed that in the recycling initiatives analyzed in this research, the response of the material was not lower than the response of a conventional mix in an intermediate or base layer. Since cold in-place recycling is a technique with evident environmental and economic benefits, it should be actively encouraged. Consequently, private companies, national and local governments, and research centres should take all possible measures to foment its use and development.

6 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo deja abiertas unas líneas de investigación que se podrían acometer en el futuro partiendo de los resultados obtenidos. Con el fin de ampliar la labor emprendida en esta Tesis Doctoral, se sugieren las siguientes líneas complementarias de estudio:

- Extensión del análisis de la aplicación de equipos no nucleares para la determinación de la densidad in situ en mezclas fabricadas con emulsión.
- Evolución del diseño de la fórmula de trabajo para la determinación del contenido óptimo de ligante en la técnica del reciclado in situ, mediante aplicación del procedimiento de compactación de laboratorio definido en esta investigación y adaptación a la reciente normativa de ensayos para mezclas bituminosas.
- Estudio del comportamiento del material reciclado fabricado en laboratorio mediante la nueva metodología definido para analizar la viabilidad de su uso en capas de rodadura.
- Ampliación del estudio de la vida a fatiga de materiales reciclados mediante el ensayo de tracción indirecta.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alkins, A.E., Lane, B., Kazmierowski, T. 2008, "Sustainable Pavements Environmental, Economic, and Social Benefits of In Situ Pavement Recycling", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2084, pp. 100-103. DOI: 10.3141/2084-11

Atkinson, K. 1994, "Manual de conservación de carreteras", *Asociación Técnica de Carreteras (ATC)*. Madrid

Austrroads Incorporated, 1997, "Asphalt Recycling Guide", *Austrroads and Australian Asphalt Pavement Association*, Sydney.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (1994) UNE 103501. UNE 103501. Geotecnia. Ensayo de compactación. Próctor modificado.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carretera. Norma UNE-EN 933-1. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Métodos del tamizado. 1998

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2007) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 6. Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas por el método hidrostático

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2006) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12. Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2007) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 30. Preparación de la muestra mediante el compactador de impactos

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2007) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 32. Compactación en laboratorio de mezclas bituminosas mediante compactador vibratorio

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2008) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 31. Preparación de la muestra mediante compactador giratorio

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2007) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 33. Elaboración de probetas con el compactador de placa

Asphalt Institute, 1986, "Asphalt Cold- Mix Recycling", Manual Series No. 21

Asphalt Institute, (1981) "Flexible Pavement Structural design", Manual Series No. 1

Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA). "The Basic Asphalt Recycling Manual". Publications.

http://www.arra.org/index.php?option=com_content&view=category&id=23&Itemid=39

Accessed 04-10-2011

Asphalt Recycling and Reclaiming Association, ARRA (1996). "Mixture and Structural Design of Cold Recycled Pavements"

Asphalt Recycling and Reclaiming Association, ARRA (1991). "Guidelines for Cold in-place Recycling" Annapolis, MD, 1991

Ayala M., Páez, A., Moreno E., García, J., Tomás, R. (2010), "Evaluación en laboratorio del uso de microemulsiones en reciclados en frío". *V Jornada Nacional de Asefma*, pp. 45-50

Bardesi, A. y Echevarría, O. (2001), "Ligantes bituminosos para mezclas recicladas en caliente", *Jornadas sobre mezcla bituminosa reciclada en caliente. Asociación Española de la Carretera*. Barcelona, pp. 43-58

- Bemarian, S., Polish, P., Maurer, G. (2006), "Cold In-Place Recycling and full-depth reclamation projects by Nevada Department of Transportation". *Transportation Research Board, Journal of the Transportation Research Board*, Nº 1949, pp. 54-71
- Branthaver, J. (1993), "Binder characterisation and evaluation. Volume 2: Chemistry" *SHRP-A-368, Strategic Highway Research Program*. Washington, D.C.
- Brosseaud, Y., Gaudefroy, V., Beghin, A., Placin, F., Delfosse, F., Baena, J.M. (2006), "Evaluation en laboratoire des propriétés mécaniques des enrobés bitumineux retraités en place par les techniques á froid". *Revue Générale des Routes et Aérodrômes*, nº 853
- Cadenas, J.M., Romero, B., Ainchil, J. (2007), "Innovaciones en los modernos tratamientos in situ o en capas granulares de firme con empleo de residuos y subproductos como herramientas de gestión eficiente y sostenible de las infraestructuras viarias". *V Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*. Sevilla.
- California Department of Transportation. Engineering Service Center (2000), "California Test 378. Method of Test for Determining the Percent and Grade of Recycling Agent to Use for Cold Recycling of Asphalt Concrete". *Business, Transportation and Housing Agency*. State of California. <http://www.dot.ca.gov/> (Acc
- Carmichael, T., Boyer, R., Hokansson, L. (1997), "Modeling heater techniques for in-place recycling of asphalt pavements" *J. Association of Asphalt Paving Technologists*, nº 46, pp. 526-540.
- Carvalho R. L., Shirazi, H., Ayres M., Jr., Selezneva, O. (2010), "Performance of Recycled Hot-Mix Asphalt Overlays in Rehabilitation of Flexible Pavements." *Transportation Research Record: Journal of The Transportation Research Board*, vol. 3, nº 10-2209 pp. 55-62
- CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento (2000), Normas NLT de ensayo de carreteras. Norma NLT-161/00. Resistencia a compresión simple de mezclas bituminosas. Madrid

- CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento (2000), Normas NLT de ensayo de carreteras. Norma NLT-162/00. Efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas bituminosas compactadas. (Ensayo de inmersión-compresión) Madrid
- CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento (1990), Normas NLT de ensayo de carreteras. Norma NLT-164/90. Contenido de ligante en mezclas bituminosas. Madrid
- Celauro, C., Bernardo, C., Gabriele, B., (2010), "Production of innovative, recycled and high-performance asphalt for road pavement", *Resources, Conservation and Recycling*. nº 54, pp. 337-347
- Chan, P., Tighe, S., Chan, S. (2010), "Exploring sustainable pavement rehabilitation: Cold-In-Place recycling with expanded asphalt mix". *Transportation Research Board*. 89th Annual Meeting
- Charmot, S., Romero, P. (2010), "Assessment of fracture parameters to predict field cracking performance of Cold In-Place Recycling mixtures". *Transportation Research Board*, 89th Annual Meeting CD-ROM.
- Consejería de Obras Públicas de la Junta de Andalucía, Laboratorio de Ingeniería de la Construcción, Universidad de Granada (2006). Proyecto de Investigación Nº GGI-1029/IDIO "Utilización de mezclas bituminosas templadas con emulsión en firmes de carreteras www.aopandalucia.es/principal.asp?alias=inv_bituminosas&zona=innovacion&t=0 Accessed 14-11-2011
- Cross, S., Fager, GA. (1995), "Fly ash in cold recycled bituminous pavements", *Transport Research Board*, nº 1486, pp. 49-56
- Cross, S. (2011), "Comparison of CIR with Mill and Fill and Two Course HMA overlay", *Annual meeting: Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA)*.

- Cross, S., Chesner, W., Justus, H., Kearney, E. (2011), "Life-Cycle environmental analysis for evaluation of pavement rehabilitation options", *Transportation Research Board, Journal of the Transportation Research Board*, nº 2227, pp. 43-52
- Damp S. (2007), "Environmental impact of recycling the usage of asphalt recycling". *Annual meeting: Asphalt Recycling and Reclaiming association (ARRA)*, Florida.
- Davison, R., Bullin, J., Glover, C., Chaffin, J, Peterson G., Lunsford, K., Lin, M., Liu, M., Ferry, M. (1994), "Verification of an asphalt aging test and development of superior recycling agents and asphalts". *Texas Transportation Institute and Chemical Department. Texas A&M UNIV*
- Decker, D., (1997), "State-of-the practice for use of RAP in hot mix asphalt." *Association of Asphalt Paving Technologists*, nº 66, pp. 704-722.
- DelRio M., Castro D., Vega A., Sánchez, E., (2011) "Effects of aggregate shape and size and surfactants on the resilient modulus of bituminous mixes". *Canadian Journal of Civil Engineers*. Vol. 38, pp. 893-899
- Díaz, J. (2005), "Precracking of cement-treated layers in Spain". *2nd International Symposium Treatment and Recycling of Materials for Transport Infrastructure*, TREMTI. París
- Eckmann, B., Delfosse, F., Walter, J., Lancaster, I., Baena, J., Odie, L., Naudat, C., Brosseaud, Y., Béghin, A., Placin, F. (2008), SCORE Project formulation studies. *Carreteras*, nº 158, pp. 56-73
- Eckmann, B., Delfosse, F., Peña, J.L., Walter, J., Lancaster, I.M., Baena, J.M., Odie, L., Naudat, C., Brosseaud, Y., Béghin, A., Placin, F. (2006), "Recyclage á froid des matériaux bitumineux – Etudes de formulation", *Revue générale des routes et aérodomes*, nº 851
- Eckmann, B., Potti, J.J., Bourrel, M., Verlhac, P., Such, C., Leal, F., Sanchez J. (2001), "Technologie á froid: les enseignements du Projet OPTEL". *Revue générale des routes et aérodomes*. nº 792, pp. 68-77

- Epps, J.A., Allen, D.D. (1990), "Cold-recycled bituminous concrete using bituminous materials". *Transportation Research Board. National Research Council (U.S.A.)*
- European Asphalt Pavement Association (EAPA), (2011). Asphalt in figures, www.eapa.org
Accessed 10-10-2011
- Federal Highway Administration (1987), "Pavement Recycling Guidelines for State Local Governments" *U.S. Department of Transportation*
- Federal Highway Administration (1997), "User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction"
- Federal Highway Administration (2000), "Recycled materials in European Highway Environments". *U.S. Department of Transportation and Federal Highway Administration*
- Fernández del Campo, J.A. (1998), "Tratado de estabilización y reciclado de capas de firmes con emulsión asfáltica", *Asociación Española de la Carretera*.
- Froumentin, M., Bauer, J.,(2006), "Influence des conditions de fraisage sur la granulométrie du matériau recyclé". *Revue générale des routes et aérodromes*, nº 852.
- Gambatese, John A., Sathyanarayanan Rajendran, (2005), "Sustainable Roadway Construction: Energy Consumption and Material Waste Generation of Roadways", *American Society of Civil Engineers, Reston, VA. Proceedings of 2005 Construction Research Congress.* (<http://tinyurl.com/yyapyts>) (accessed 09-12-2011)
- Gorski, M. (2007), "Determinación del módulo en las capas recicladas en frío", *Carreteras* nº 154
- Head, R.W. (1974), "An informal report of cold mix research using emulsified asphalts as a binder". *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 43, pp. 300-319
- Hosking, R., (1992), "Road aggregate and skidding". *TRL State of the art review-4*.
- Huang, Y., Bird, R.N., Heidrich, O. (2007), "A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements", *Resources Conservation & Recycling*, vol.52 (1), pp. 58-73

- Instituto Nacional de Estadística (2011). "Encuestas sobre la generación de residuos. Año 2007", www.ine.es/ioe Accessed 13-06-2011
- Johansson, L. (1998), "Bitumen aging and hydrated lime" *TRITA-IP FR- 98-38. Doctoral dissertation, Division of Highway Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.*
- Karlsson, R., Isacson, U. (2006), "Material-Related aspects of asphalt recycling-state-of-the-art", *Journal of Materials in Civil Engineering*. vol.18 (ASCE) 0899-1561. 18:1(81)
- Karlsson R. (2002), "Investigations of binder rejuvenation related to asphalt recycling", *Doctoral dissertation, Division of Highway Engineering, Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden*
- Kavussi, A., Modarre, A. (2010), "Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement", *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 1920-1927
- Kennedy, T.W., (1977), "Characterization of Asphalt Pavement Materials Using the Indirect Tensile Test". *Asphalt paving technology, Proceedings Association of Asphalt Paving Technical Sessions* (San Antonio, Texas), vol. 46, 132-149.
- Kennedy, T.W., Hudson, W.R., (1968), "Application of the indirect Tensile Test to Stabilized Materials". *Highway Research Record*, no. 235, Highway Research Board, pp. 36-48.
- Kim, J., Lee, H., Jähren, C., Heitzman, M., Chen, D. (2010), "Long-Term field performance of cold in-place recycled roads in Iowa". *Transportation Research Board 86th Annual Meeting Compendium of Papers* CD-ROM. Report Number: 07-1259
- Kim, Y., Lee, H. (2010) "Performance Evaluation of Cold In-Place Recycling Mixtures Using Emulsified Asphalt", *Transportation Research Board 86th Annual Meeting Compendium of Papers* DVD. Report Number: 10-4010
- Kraemer, C, Pardillo, J.M., Rocci, S., Romana, M., Sánchez, V., del Val, M.A. (2004), *Ingeniería de Carreteras*, vol. II. Editorial Mc Graw Hill.

- Lancaster, M., Walter, J., Attané, P., Kalaaji, A. (2006), "Régénération du bitumen dans le recyclage á froid". *Revue générale des routes et aerodromes*, nº 848
- Lane, B., Kazmierowski, T. (2005), "Implementation of Cold In-Place Recycling with expanded asphalt technology in Canadá", *Transportation Research Board, Journal of the Transportation Research Board*, nº 1905, pp. 17-24
- Lee, J. M., Salgado, R., Benal, A., Novell, C. W. (1999), "Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, vol. 25. nº 2; pp.132-141.
- Lefort, M. (1997), "Le point sur le retraitement en place á froid des anciennes chaussées" *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, nº 212, París (France).
- Lesueur, D. (2000), "Emulsion aggregates interactions through water analysis", *2nd Euroasphalt and Eurobitume Congress*. Barcelona, Book 2, pp. 315-325
- Lesueur, D., Herrero, L., Uguet, N., Hurtado, J., Peña, J.L., Potti, J.J., Walter, J., Lancater, I.M. (2006), "Emulsions de bitume micronisées et leur potntiel d'emploi en recyclage á froid", *Revue générale des routes et aérodromes*, nº 850
- Lesueur, D., Baena, J.M., Peña, J.L., Fiedler, J. (2008), "Validación in-situ del Proyecto SCORE", *Carreteras*, nº 158, pp. 84-91
- Lesueur, D., Herrero, L., Uguet, N., Hurtado, J., Potti, J.J., Walter, J., Lancaster, I. (2010), "Nanoemulsiones de betún y su interés para el reciclado en frío de mezclas bituminosas". *Carreteras, Edición Especial XVI Congreso Mundial de la IRF*, pp. 16-20
- Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras (2002), "Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de conservación de carreteras, PG-4. Artículo 20. Reciclado in situ con emulsión de capas bituminosas". Orden Circular 8/2001
- Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras (2003a), "Norma 6.3 IC. Rehabilitación de Firmes". Orden FOM 3459/2003

- Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras (2003b), "Norma 6.1- IC "Secciones de Firme". Orden FOM 3460/2003
- Miró, R., Centeno, M., Martínez, A., Pérez, F. (2007), "Evaluación de los métodos de reciclado y rehabilitación de firmes a partir del análisis de los tramos experimentales del proyecto europeo PARAMIX" *Infraestructura Vial*. nº 18, pp. 15-23.
- Miró, R., Pérez, F., Castillo, S. (2000), "Mixed recycling with emulsion and cement of asphalt pavements. Design procedure and improvements achieved" *Materials and Structures*. vol. 33, pp. 324-330
- Mollenhauer, K. (2011), "Best Practices for dismantling and recycling road materials", *Direct-Mat. Final Workshop*, http://direct-mat.fehrl.org/?m=49&id_directory=1438 Accessed 15-12-2011
- Moreno, F., Rubio, M.C., Martínez-Echevarría, M.J. (2012) "The mechanical performance of dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes: The influence of digestion time and crumb rubber percentage". *Construction and Building Materials*, vol 26, pp. 466-474
- Moreno, F., Rubio, M.C., Martínez-Echevarría, M.J. (2011), "Reuse of sludge from the decorative quartz industry in hot bituminous mixes", *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 2465-2471
- Morian, D.A., Zhao, Y., Arellano, J., Hall, D.E. (2005), "Asphalt Pavement Rehabilitation Treatment. Analysis of 20 years of performance". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. n-1905, pp. 36-43.
- Niazi, Y., Jalili, M. (2009), "Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion", *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 1338-1343
- Odie, L., Naudat, C., Brosseaud, Y., Beghin, A., Eckmann, B., Delfosse, F. (2006), "Evaluation de la réactivité chimique et de la montée en cohésion au jeune age des matériaux bitumineux recyclés á froid". *4º Congrès Mondial de l'Emulsion*, Article 1.4- 311.

- Organization for Economic Co-operational and Development (OECD) www.oecd.org Accessed 13-06-2011
- Páez,A., García J.L., Tomás, R., Potti, J.J. (2009), “Nuevas Tecnologías en el reciclado en frío de pavimentos asfálticos”. *XV Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto*
- Peña, J.L., Almazán, D. (2007), “Cold-mix in situ recycling incorporating emulsion. Review of the technique”. *Carreteras*, nº 155
- Pereira, P., Picado-Santos, L. (2006), “Technical-Economical Evaluation of pavement recycling alternatives”, *Third Gulf Conference on Roads*, Muscat, Sultanate of Oman
- Pérez, F., Miró, R., Martínez, C. (2003), “Proyecto Paramix. Investigación sobre reciclado de pavimentos”, *Carreteras*, nº 130, pp. 77-85
- Petersen, J. (2000), “Chemical composition of asphalt as related to asphalt durability”, *Asphaltenes and Asphalts, Developments in Petroleum Science* 40B. ISBN 10: 0-444-50324-2, Elsevier, New York.
- Poon, C. S., Chan, D. (2006), “Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base”, *Construction and Building Materials*, vol. 20, pp. 578-585.
- Potti, J.J. (1999), “Emulsiones catiónicas de rotura lenta en carreteras. Primeros resultados del proyecto OPTTEL”. *Carreteras*, nº. 103, pp. 81-97
- Potti, J.J., Mancebo, J. (2002a), “Propuesta para el diseño y sistemática en el desarrollo de obras de reciclado en frío in situ”, *Carreteras*, nº 124, pp. 61-76.
- Potti, J.J., Martínez, M., Mancebo, J. (2002b), “Diseño y sistemática de Probisa en el desarrollo de obras de reciclado en frío con emulsión in situ”, *Boletín Técnico de Probisa*, 44.
- Potti, J.J. (2002c), “Los principales resultados del proyecto OPTTEL”, *Carreteras*, nº 122, pp. 40-59
- Proyecto Fénix (2007) www.proyctofenix.es Accessed 25-10-2011

- Roberts, J., Kandhal, P., Brown, E., Lee, D., Kennedy, T. (1996), "Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction." *2nd ED. National Asphalt Pavement Association, NAPA, USA*, ISBN-10: 0914313010
- Romero, P. (2002), "Evaluation of non-nuclear gauges to measure density of hot-mix asphalt pavements", Pool Fund Study. *Department of Civil and Environmental Engineering. The University of Utah.*
- Sebaaly, P.E., Bazi, G., Hitti E., Weitzel, D. and Bemanian, S. (2004), "Performance of cold in-place recycling in Nevada", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, nº 1896, pp. 162-169
- Sherwood, P.T., (1995), "Alternative materials in road construction. A guide to the use of waste, recycles materials and by-product", *Thomas Telford Publishing*. ISBN 13: 978 0 7277 3031 2
- Schmidt, R.J., Santucci, L.E., Coyne, L.D. (1973), "Performance characteristics of cement-modified asphalt emulsion mixes", *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, vol. 42, pp. 110-131
- Tam, V., Tam C.M., (2006), "A review on the viable technology for construction waste recycling". *Resources, Conservation & Recycling*, vol.47 (3), pp.209-221
- Thenoux, G., García, G. (1999), "Reciclado en frío de pavimentos asfálticos. Diseño de mezclas en base a emulsiones" *Carreteras*, nº 105, pp. 67-78
- Terrel, R., Epps, J., Joharifard, M., Wiley, P. (1997), "Progress in hot in-place recycling technology", *8th International Conference on Asphalt Pavements*, Seattle (USA)
- Tesoriere, G., Marino, S. Thermic (1990), "Effects for Rupture Tests at Indirect Tensile Test on Asphalt Concrete", *Proceedings of the Fourth International Symposium Held by RILEM* (Budapest), PP. 320-328

- Tomás, R. (1998), "Rehabilitación de firmes de carretera con problemas estructurales o superficiales. Reciclado en frío", *Ingeopres: actualidad técnica de ingeniería civil, minería, geología y medio ambiente*", vol. 135, pp. 44-49
- Trans Tech Systems. (2003), "Pavement Quality Indicator. Model 301. Operator`s Handbook"
- Unión Europea. Europa- El portal de la Unión Europea http://europa.eu/index_en.htm. Accessed 13-06-2011
- Valdés G., Pérez-Jiménez F., Miró R., Martínez A., Botella R., (2011), "Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP)", *Construction and Building Materials*, Vol. 25, Issue 3, pp. 1289-1297
- Vasallo Magro, J.M. (2001), "Evaluación de los sobrecostos del transporte por carretera en España debidos a una insuficiente conservación". *Carreteras*, vol. 116, pp. 19-31.
- Wirtgen GmbH (2010), "Wirtgen Cold Recycling Technology", Germany. ISBN 3-936215-05-7, pp. 74-77
- Yan, J., Ni, F., Yang, M., Li, J. (2010), "An experimental study on fatigue properties of emulsion and foam cold recycled mixes" *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 2151-2156
- Yoder, E.J., Witczak, M.W. (1975) "Principles of pavement design". *John Wiley & Sons Inc.*, Second Edition, USA.

