

UNIVERSIDAD DE GRANADA



**PROGRAMA DE DOCTORADO:
INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE
MEZCLAS BITUMINOSAS. NORMATIVA NLT-NORMATIVA UNE-EN**

TESIS DOCTORAL - 2012
GEMA MARÍA GARCÍA TRAVÉ

Para la obtención del
TÍTULO DE DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE GRANADA

DIRECTORA:
D^a. M^a CARMEN RUBIO GÁMEZ
Doctora Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos
Universidad de Granada



Universidad de Granada



TESIS DOCTORAL – 2012

Memoria presentada por D^a. Gema María García Travé para aspirar al título de Doctor por la Universidad de Granada

La doctoranda Gema María García Travé y la directora de la tesis “*Análisis comparativo del comportamiento mecánico de mezclas bituminosas. Normativa NLT - Normativa UNE-EN*” garantizamos, al firmar esta tesis doctoral, que el trabajo ha sido realizado por la doctoranda bajo la dirección de la directora de la tesis y hasta donde nuestro conocimiento alcanza, en la realización del trabajo, se han respetado los derechos de otros autores a ser citados, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

Granada, septiembre 2012

Directora de la Tesis:

La Doctoranda

Fdo.: D^a. M^a Carmen Rubio Gámez

Fdo: Gema María García Travé

AGRADECIMIENTOS

Son tantas las personas a las que me gustaría agradecer la ayuda prestada durante la elaboración de esta Tesis Doctoral que es difícil enumerarlas. A todos, muchas gracias por aportar vuestro granito de arena en la elaboración de esta Tesis Doctoral.

Quiero agradecer a mi directora de tesis, D^a M^a Carmen Rubio Gámez por su confianza en mí y por la oportunidad brindada en la realización de esta Tesis Doctoral así como por el tiempo que me ha dedicado en su realización y su interés por los avances conseguidos.

A todos mis compañeros del Laboratorio de Ingeniería de la Construcción, labIC, por la ayuda que me han prestado de manera incondicional y por las palabras de ánimo en todo momento. Es una suerte trabajar con vosotros.

A mi marido, José Manuel, gracias por todo el apoyo, comprensión y dedicación que me ha ofrecido en estos años. Has logrado que me mantenga firme en alcanzar este objetivo.

Gracias a mis padres, a mi hermano, a mi familia política y amigos por estar siempre cuando os he necesitado y prestarme vuestro apoyo y ayuda en los momentos difíciles. Gracias por vuestra confianza.

Por último, quiero expresar mi agradecimiento a la Universidad de Granada que junto con la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía, y las empresas: Aldesa, Eiffage Infraestructuras, Martín Casillas, Ploder, Sacyr y Construcciones Vera han posibilitado la realización de esta investigación.

RESUMEN

El 1 de marzo de 2008 entró en vigor el Mercado CE para la libre circulación de productos de construcción en el mercado interior de la Unión Europea.

Hasta ese momento no se disponían de unos criterios normalizados que agrupasen de manera común los diferentes tipos de mezclas asfálticas que se desarrollaban en cada uno de los estados miembros de la UE y que disponían de características y normalización individuales. Es por ello por lo que surge la necesidad de armonizar las mezclas bituminosas empleadas en todos los países de la UE. En consecuencia, España, al igual que el resto de los países de la UE, debe adaptarse a estas normas armonizadas.

Esta obligación de caracterizar las mezclas bituminosas mediante ensayos diferentes a los que se venían empleando en España conlleva, necesariamente, el cambio de las prescripciones técnicas obligatorias, pues se deben establecer también respecto a los nuevos ensayos.

Como consecuencia surge la necesidad de estudiar y valorar la influencia de la normativa europea en el diseño y prescripciones técnicas de las mezclas, bajo la normativa NLT (elaboradas por el Laboratorio de Transportes) utilizada en España hasta la entrada en vigor del Mercado CE y la nueva normativa UNE-EN, para así evaluar el comportamiento de las mezclas frente a los nuevos métodos de ensayo así como las nuevas prescripciones recogidas en la Orden Circular 24/2008 del PG-3.

El objetivo principal de este trabajo de investigación consiste en analizar dos de los nuevos ensayos europeos que han introducido grandes cambios con respecto a los vigentes hasta ese momento. Así se analizan el ensayo de rodadura UNE-EN 12697-22 que sustituye al anterior ensayo en pista definido por la norma NLT-173 y el Ensayo de sensibilidad al agua que sustituye al ensayo de inmersión-compresión NLT-162, concluyéndose que para la mezcla considerada, AC16 Surf 35/50 S, existe una diferencia estadísticamente significativa entre estos ensayos estudiados. Para finalizar se sugieren unos valores para las especificaciones exigidas por la Orden Circular 24/2008 del PG-3 que se equiparan con los límites de especificación del PG-3/2004 referente a la normativa NLT.

Palabras clave: mezclas bituminosas, comportamiento mecánico, ensayo sensibilidad al agua, ensayo de inmersión-compresión, deformaciones plásticas, ensayo de rodadura, ensayo de pista.

ABSTRACT

On March 1st 2008 came into force the CE Marking for the free circulation of construction products in the European Union's internal market.

Until that time standardized criteria which group the different types of asphalt mixtures developed in each of the States Members of the EU and which had individual characteristics and standardization methods was not available. For this reason there is a need to harmonize the bituminous mixtures used in all EU countries. As a result, Spain, like the rest of the EU countries, must adapt to these harmonized standards.

This obligation to characterize the bituminous mixtures using different test to those that were previously being used in Spain involves, necessarily, the change of the mandatory technical requirements, because they also must be established regarding the new trials.

Consequently there is a need to study and evaluate the influence of the European regulations on the design and technical requirements of the mixtures, under NLT standards (developed by the Laboratory of Transports) used in Spain until the entry into force of the CE Marking and the new UNE-EN regulations, in order to evaluate the behavior of mixtures compared to the new test methods and new requirements contained in the Orden Circular 24/2008 of the PG-3.

The main objective of this research is to analyze two of the new European tests that have introduced mayor changes with regard to the current at that time. Therefore the tests analyzed were the wheel tracking test UNE-EN 12697-22 replacing the previous track test by the standard NLT-173 and the water sensitivity test which replaces the NLT-162 immersion-compression test, concluding that for the considered mixture, AC16 Surf 35/50 S, there is a statistically significant difference between these trials studied. To finish, values for the specifications required by the Order Circular 24/2008 of the PG-3 which equate with the PG-3/2004 concerning NLT specification limits are suggested.

Keywords: bituminous mixtures, mechanical behavior, water sensitivity test, immersion-compression test, plastic deformations, wheel tracking test, track test.

ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL

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

En el capítulo 1 se detallan los antecedentes y se formulan los objetivos de la investigación que se van a desarrollar en esta Tesis Doctoral.

En el capítulo 2, tras una revisión bibliográfica, se presenta el estado del arte en el que se recopila información acerca de la composición, clasificación, propiedades y diseño de las mezclas bituminosas en caliente. Además, se presentan las principales consideraciones respecto al Mercado CE. A continuación se realiza un análisis sobre el efecto del agua y las deformaciones plásticas en las mezclas bituminosas. Posteriormente se analizan en profundidad los ensayos utilizados en España para determinar la resistencia al agua y las deformaciones plásticas, mediante la normativa actual (UNE-EN) y la normativa a la que sustituye (NLT). Los ensayos estudiados son: sensibilidad al agua (UNE-EN 12697-12) que sustituye al ensayo de inmersión-compresión (NLT-162), y el ensayo de rodadura (UNE-EN 12697-22) que sustituye al ensayo en pista (NLT-173).

En el capítulo 3, se explica la metodología llevada a cabo en la investigación especificando cada una de las etapas seguidas y los ensayos realizados para la consecución de los objetivos propuestos.

El capítulo 4 se dedica al análisis de resultados donde se desarrolla un estudio estadístico para comprobar la equivalencia de los límites de especificación de los ensayos mencionados anteriormente.

En el capítulo 5 se exponen las conclusiones obtenidas. En el capítulo 6 se señalan las posibles futuras líneas de investigación relacionadas con lo expuesto en este trabajo.

En el último epígrafe se detallan las referencias bibliográficas consultadas para la elaboración de esta Tesis Doctoral.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. ANTECEDENTES	3
1.2. OBJETIVOS	4
1.2.1. Objetivo principal	4
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
2. ESTADO DEL ARTE	11
2.1. INTRODUCCIÓN	11
2.2. MEZCLAS BITUMINOSAS	11
2.2.1. Composición	11
2.2.2. Tipos de mezclas bituminosas.....	13
2.2.3. Propiedades de las mezclas bituminosas.....	15
2.2.4. Diseño de mezclas bituminosas en caliente	19
2.3. MARCADO CE: NORMATIVA EUROPEA. CAMBIOS EN EL PG-3	20
2.4. EFECTO DEL AGUA SOBRE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS	24
2.4.1. Definición	24
2.4.2. Mecanismos de los daños producidos por el agua	24
2.4.3. Modos de transporte del agua en mezclas bituminosas	26
2.4.4. Manifestaciones en el firme de los daños producidos por el agua en las mezclas bituminosas	27
2.4.5. Factores que influyen en los daños producidos por el agua.....	28
2.4.5.1 Factores Internos	28
2.4.5.2 Factores Externos.....	31
2.4.6. Tratamientos para limitar la susceptibilidad al agua de las mezclas bituminosas en caliente	33
2.4.7. Ensayos de laboratorio para evaluar la susceptibilidad al agua de las mezclas bituminosas	35
2.4.7.1. Métodos de ensayo sobre mezcla bituminosa sin compactar.....	35
2.4.7.2. Métodos de ensayo sobre mezclas bituminosas compactadas.....	36
2.4.8. Métodos de ensayo para determinar el efecto del agua en España: NLT-162 y UNE-EN 12697-12.....	41

2.4.8.1. Efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas bituminosas compactadas. (Ensayo de inmersión-comprensión). NLT-162.	41
2.4.8.2. Sensibilidad al agua. UNE-EN 12697-12.	42
2.4.8.3. Ensayo NLT-162 frente UNE-EN 12697-12.	43
2.4.9. Consideraciones finales.	47
2.5. DEFORMACIONES PLÁSTICAS PERMANENTES EN MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE	47
2.5.1. Definición	48
2.5.2. Mecanismos de formación de roderas	48
2.5.3. Factores que influyen en la formación de roderas	50
2.5.3.1. Factores internos.	50
2.5.3.2. Factores externos	57
2.5.4. Ensayos de laboratorio para evaluar las deformaciones plásticas permanentes.	58
2.5.4.1. Ensayos fundamentales	59
2.5.4.2. Ensayos empíricos	62
2.5.4.3. Ensayos de simulación	62
2.5.5. Métodos de ensayo para evaluar la deformación plástica en España: NLT-173 y UNE-EN 12697-22	66
2.5.5.1. Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio. NLT-173.	66
2.5.5.2. Ensayo rodadura UNE-EN 12697-22	68
2.5.5.3. Ensayo NLT-173 frente a UNE-EN 12697-22	70
2.5.6. Consideraciones finales.	74
3. METODOLOGÍA	79
3.1. INTRODUCCIÓN	79
3.2. MATERIALES	79
3.3. PLAN DE ENSAYOS	81
3.3.1. Análisis del efecto del agua sobre las mezclas bituminosas	82
3.3.2. Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante ensayo en pista.	91
3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS.	96

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	103
4.1. ENSAYO DE INMERSIÓN-COMPRESIÓN NLT-162 / ENSAYO DE SENSIBILIDAD AL AGUA UNE-EN 12697-12.	103
4.2. PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO NLT-173 / ENSAYO DE RODADURA UNE-EN 12697-22	109
5. CONCLUSIONES	121
6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACION	127
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de rodera	16
Figura 2. Ejemplo piel de cocodrilo	17
Figura 3. Molde de compactación y prensa.	44
Figura 4. A. Compactador de impactos B. Compactador vibratorio C. Compactador giratorio	44
Figura 5. Sistema de vacío	45
Figura 6. A. Compresión simple B. Tracción indirecta.....	46
Figura 7. Equipo de compactación NLT 173	67
Figura 8. Máquina de ensayo	68
Figura 9. Compactador Segmentos de Rodillo	69
Figura 10. Equipo de ensayo utilizado con ambas normas	72
Figura 11. Curva granulométrica	81
Figura 12. Esquema trabajo en laboratorio ensayos análisis del efecto del agua	82
Figura 13. Probetas grupo seco del ensayo de inmersión-compresión	83
Figura 14. Rotura probetas en el ensayo de inmersión-compresión.....	84
Figura 15. Probetas grupo húmedo del ensayo de inmersión-compresión.....	84
Figura 16. Probetas del ensayo de sensibilidad al agua.....	85
Figura 17. Toma dimensiones probetas del ensayo de sensibilidad al agua	86
Figura 18. Densidad según UNE-EN 12697-6 (AENOR, 2007a) procedimiento B:SSD	87
Figura 19. Probetas grupo seco del ensayo de sensibilidad al agua	88
Figura 20. Probetas grupo húmedo del ensayo de sensibilidad al agua en recipiente de vacío	88
Figura 21. Probetas grupo húmedo del ensayo de sensibilidad al agua en baño de agua a 40°C	89
Figura 22. Rotura probetas en el ensayo de sensibilidad al agua.....	89
Figura 23. Tipos de roturas.....	90
Figura 24. Esquema trabajo en laboratorio ensayos deformaciones plásticas.	91
Figura 25. Compactación probetas del ensayo en pista	92
Figura 26. Probetas del ensayo en pista	92
Figura 27. Probeta preparada para iniciar el ensayo en pista	93
Figura 28. Compactación probetas del ensayo de rodadura	94
Figura 29. Probeta del ensayo de rodadura.....	95
Figura 30. Probeta preparada para iniciar el ensayo de rodadura	95
Figura 31. Representación resultados tabla 8.....	103
Figura 32. Representación resultados NLT-162, junto con prescripción PG-3 (2004)....	105
Figura 33. Representación resultados UNE-EN 12697-12, junto con prescripción OC. 24/2008	105

Figura 34. Gráficos de normalidad para las variables inmersión-compresión y sensibilidad al agua	107
Figura 35. Representación resultados tabla 15, junto con prescripción PG-3 (2004)	112
Figura 36. Representación resultados tabla 16, junto con prescripción O.C.24/2008...	112
Figura 37. Gráficos de normalidad para las variables ensayo en pista y ensayo rodadura	114
Figura 38. Representación resultados tabla 16, junto con prescripción O.C.24/2008 y el valor recomendado en este trabajo	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Designación mezclas bituminosas tipo Hormigón Bituminoso	22
Tabla 2. Designación mezclas bituminosas tipo discontinuo.....	23
Tabla 3. Diferencias entre UNE-EN 12697-12 y NLT-162	46
Tabla 4. Criterio de elección de molde según el tamaño máximo del árido	67
Tabla 5. Diferencias entre UNE-EN 12697-22 y NLT-173	74
Tabla 6. Características de los áridos	80
Tabla 7. Características del betún	80
Tabla 8. Resultados NLT-162 / UNE-EN 12697-12	104
Tabla 9. Análisis de regresión variable inmersión-compresión/sensibilidad al agua.	106
Tabla 10. ANOVA variable inmersión-compresión/sensibilidad al agua.....	106
Tabla 11. Resumen del modelo variable inmersión-compresión/sensibilidad al agua.	106
Tabla 12. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra para las variables inmersión-compresión y sensibilidad al agua.	107
Tabla 13. Prueba T de igualdad de medias para las variables inmersión-compresión y sensibilidad al agua.	108
Tabla 14. Test de Kolmogorov-Smirnov para las variables inmersión-compresión y sensibilidad al agua.	109
Tabla 15. Resultados ensayo en pista NLT-173.....	110
Tabla 16. Resultados ensayo de rodadura UNE-EN 12697-22	111
Tabla 17. Análisis de regresión variable ensayo en pista/ensayo rodadura.....	113
Tabla 18. Análisis de regresión variable ensayo en pista/ensayo rodadura.....	113
Tabla 19. Resumen del modelo variable ensayo en pista/ensayo rodadura.....	113
Tabla 20. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra para las variables ensayo en pista y ensayo rodadura.	114
Tabla 21. Prueba T de igualdad de medias para las variables ensayo en pista y ensayo rodadura.....	115
Tabla 22. Test de Kolmogorov-Smirnov para las variables ensayo en pista y ensayo rodadura.....	116

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Este trabajo de investigación forma parte de los trabajos desarrollados en el marco del proyecto de investigación denominado “Nuevas Tecnologías de aplicación a las obras de ingeniería civil, PI: Estudio comparativo de mezclas bituminosas en la Comunidad Autónoma Andaluza” fruto del convenio de colaboración de la Universidad de Granada con la Consejería de Obras Públicas y Transportes, y las empresas: Aldesa, Eiffage Infraestructuras, Martín Casillas, Ploder, Sacyr y Construcciones Vera.

La necesidad de unificar la designación de los diferentes tipos de mezclas asfálticas que se desarrollaban en cada uno de los estados miembros de la UE y que disponían de características y normalización individuales, ha dado lugar a la creación de unas normas armonizadas.

Como consecuencia de ello, España al igual que el resto de los países de la UE, debe adaptarse a estas normas armonizadas en marzo de 2008.

El Comité Europeo de Normalización (CEN) recoge la normativa en dos series de normas: EN-13108 y EN-12697. Estas normas son las que están actualmente en vigor en toda la UE, recogidas en España como normas UNE-EN, sustituyen a las normas NLT y/o UNE, que se han tenido como referencia en España, Potti (2007).

La serie de normas EN-13108 son normas de carácter obligatorio y tienen por objeto establecer las especificaciones de las Mezclas bituminosas. Recogen los criterios mínimos a exigir en los materiales empleados y en su sistema de producción, es decir, el Ensayo de Tipo Inicial y el Control de Producción en Planta.

A su vez, estas especificaciones indican el correspondiente método de ensayo para evaluar cada propiedad, recogido en la serie de normas EN-12697. En ella aparecen 43 métodos de ensayo, en los que se ha pretendido englobar los métodos de los diferentes países, pudiendo en muchos casos elegirse entre varias posibilidades.

La obligación de caracterizar las mezclas bituminosas mediante ensayos distintos a los que se han estado empleando en España, conlleva el cambio de las prescripciones técnicas obligatorias, en concreto, la revisión de los artículos 542 y 543 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3).

Esta situación de nuevos ensayos, como consecuencia de la entrada en vigor del mercado CE para mezclas asfálticas, junto con el hecho detectado de que algunas de las mezclas que con la normativa NLT resultaban aptas para su puesta en obra; con los ensayos UNE no cumplen las especificaciones técnicas, ha motivado el desarrollo de esta investigación.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo principal

El objetivo principal de este trabajo de investigación es analizar el comportamiento de las mezclas bituminosas bajo la normativa NLT y UNE-EN, con objeto de analizar los resultados obtenidos para una misma mezcla en los distintos ensayos y poder aportar recomendaciones en cuanto a las prescripciones técnicas exigibles a las mezclas bituminosas en caliente ensayadas con la normativa UNE-EN.

1.2.2. Objetivos específicos

Uno de los objetivos específicos de esta investigación es analizar en profundidad los ensayos: sensibilidad al agua, UNE-EN 12697-12:2009, y el ensayo de rodadura, UNE-EN 12697-22:2008+A1, para poder realizar un estudio comparativo de los mismos con los ensayos a los que sustituyen: ensayo de inmersión-compresión, NLT-162/00, y ensayo en pista, NLT-173/00.

Por otra parte, uno de los objetivos de estudio comparativo es la revisión y o formulación de prescripciones exigibles a mezclas bituminosas ensayadas bajo la normativa UNE-EN.



2. ESTADO DEL ARTE

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de este capítulo se lleva a cabo un estudio del estado del arte de dos de los deterioros que más preocupan dentro del estudio del comportamiento de las mezclas bituminosas en caliente, los producidos por el efecto del agua y las deformaciones plásticas permanentes, así como los ensayos de laboratorio que se utilizan para evaluarlos.

En primer lugar, se describen los distintos tipos y propiedades de las Mezclas Bituminosas en Caliente, así como su diseño.

A continuación se revisa la normativa aplicable a las Mezclas Bituminosas en Caliente que han sufrido cambios con la entrada en vigor del Mercado CE en España, se centra en los ensayos de laboratorio que se utilizan para evaluar la susceptibilidad al agua y las deformaciones plásticas permanentes en las Mezclas Bituminosas en Caliente.

Posteriormente se estudia con detalle los mecanismos que provocan estos deterioros así como los factores que influyen y los distintos ensayos de laboratorio que existen para su evaluación, haciendo hincapié en los ensayos de laboratorio que han sido sustituidos en España y estudiando las diferencias con los nuevos métodos de ensayo que los remplazan.

En este capítulo se recopilan distintas experiencias encontradas en el estudio bibliográfico relacionados con este tipo de deterioros.

De todo lo revisado se recopilan unas consideraciones finales que justifican el desarrollo de este trabajo.

2.2. MEZCLAS BITUMINOSAS

Las mezclas bituminosas (o aglomerados asfálticos) están formadas por una combinación de áridos y un ligante hidrocarbonado (betún o algunos de sus derivados), de manera que los áridos quedan cubiertos por una película continua de ligante. Estas mezclas se fabrican de forma mecánica en centrales que pueden ser fijas o móviles, se transportan a la obra y se extienden y compactan (Kraemer et al., 2004).

El betún es un material viscoelástico y los áridos elastoplásticos, considerándose por tanto, a las mezclas bituminosas como un material viscoelastoplástico.

2.2.1. Composición

ÁRIDOS

Los áridos se consideran como un conjunto de partículas discretas y de naturaleza inerte, aunque hay que tener en cuenta que se pueden producir algunas reacciones por el contacto

tanto con el agua, como con los ligantes y los conglomerantes. Los áridos se pueden clasificar como:

- *Áridos naturales*, que proceden de la disgregación de las rocas y se extraen en yacimientos o canteras. Se utilizan solamente después de una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse a las exigencias según su disposición final.
- *Áridos artificiales*, que proceden bien de procesos industriales, de los cuales son un subproducto, o bien del tratamiento industrial de áridos naturales; también pueden proceder de la trituración y posterior clasificación de productos de demolición y del reciclado de firmes envejecidos.

En las capas de firme, de las que forman parte, aportan a la resistencia fundamentalmente la componente de rozamiento interno.

Las propiedades de los áridos van a depender de su granulometría, propiedades físicas y químicas.

LIGANTES HIDROCARBONADOS

Son materiales aglomerantes, sólidos o líquidos, constituidos por mezclas complejas de hidrocarburos.

Una de las propiedades que poseen es la termoplaticidad, lo que hace que al aumentar la temperatura se disminuya la consistencia y que al disminuir la temperatura el proceso sea el inverso alcanzando una consistencia sólida.

Otra de las propiedades a tener en cuenta es su envejecimiento; en los distintos procesos de manipulación al que se ve sometido el ligante durante su almacenamiento y aplicación, como el calentamiento a temperaturas elevadas en presencia de aire que provoca reacciones de oxidación que modifican sus propiedades. Esta oxidación es acelerada también por los rayos ultravioleta. Este conjunto de alteraciones es lo que se conoce como envejecimiento. Para estudiar el envejecimiento se utilizan dos tipos de ensayo: los que analizan el envejecimiento a corto plazo y los que analizan el envejecimiento a largo plazo. Entre los primeros los más empleados son el TFOT (Thin film oven test) y el RTFOT (Rolling thin film oven test). Respecto a los ensayos de envejecimiento a largo plazo, el ensayo más empleado es el PAV (Pressure Ageing Vessel).

Dentro de los ligantes hidrocarbonatos se pueden diferenciar:

- *Betunes asfálticos*, son subproductos de las refinerías de petróleo. Es un sistema coloidal tipo gel que a temperatura ambiente es sólido o semisólido, por lo que requiere un calentamiento previo. Los betunes asfálticos son los más utilizados en la construcción de carreteras.

- *Betunes fluidificados*, disolución de betún asfáltico en un fluidificante. La disolución puede ser en aceite o en un derivado del petróleo. El efecto del fluidificante es rebajar la viscosidad.
- *Betunes fluxados*, son una variante de los anteriores en la que el producto usado como fluidificante no es derivado del petróleo, sino que procede de la destilación de la hulla.
- *Emulsiones*, son dispersiones de betún en agua que pueden emplearse a temperatura ambiente ya que se encuentran en estado líquido.
- *Ligantes modificados*, son ligantes hidrocarbonados, a los que se le añade aditivos, dotados de superiores características reológicas y mecánicas que permiten una mayor durabilidad de los tratamientos que lo utilizan. Dentro de los aditivos que se le añaden, los más empleados son los polímeros.

2.2.2. Tipos de mezclas bituminosas

La clasificación de las mezclas bituminosas es distinta dependiendo del parámetro que se considere (Kraemer et al., 2004).

Así se pueden clasificar según:

FRACCIONES DEL ÁRIDO EMPLEADAS:

Este listado no es exhaustivo, la diversidad de materiales requiere una clasificación más precisa siguiendo diferentes criterios de construcción o de composición.

- Masilla bituminosa: polvo mineral más ligante.
- Mortero bituminoso: árido fino más masilla.
- Hormigón bituminoso: árido grueso más mortero.
- Macadam bituminoso: árido grueso más ligante.

TEMPERATURA DE PUESTA EN OBRA

Es la clasificación más tradicional, dentro de ella se pueden distinguir las mezclas en frío y las mezclas en caliente.

Las mezclas en frío son aquellas cuya puesta en obra se realiza a temperatura ambiente. El ligante utilizado suele ser una emulsión bituminosa.

Las mezclas en caliente se fabrican con betunes asfálticos a unas temperaturas más o menos elevadas que van a depender de la viscosidad del ligante, calentándose también los áridos para que el ligante no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se lleva a

cabo a temperaturas mayores que a la temperatura ambiente, si esto no ocurriera estos materiales no podrían extenderse y menos aún compactarse de manera adecuada.

PROPORCIÓN DE HUECOS EN MEZCLA

Mezclas densas o cerradas: la proporción de huecos mezcla no supera el 6%.

Mezclas semicerradas: son mezclas con un contenido de huecos comprendido entre el 6 y el 12%. En este grupo están incluidas las mezclas gruesas.

Mezclas abiertas: Si la proporción de huecos mezcla supera el 12 %. Formadas esencialmente por árido grueso y ligante.

Mezclas drenantes o porosas: son mezclas con un contenido de huecos superior al 20%. Permiten construir capas de rodadura muy permeables. Siempre deben apoyarse sobre una capa impermeable para evitar que el agua llegue a las capas granulares del firme.

TAMAÑO MÁXIMO DEL ÁRIDO

Se pueden distinguir las mezclas gruesas en las que el tamaño máximo del árido es mayor de 10 mm y las mezclas finas o microaglomerados cuyo tamaño máximo es menor de 10 mm.

SEGÚN LA GRANULOMETRÍA DE LOS ÁRIDOS

Las mezclas se pueden clasificar en:

- *Continuas*: se caracteriza por una curva granulométrica en la que están representados todos los tamaños, donde las partículas más finas rellenan los huecos que dejan las más gruesas. Son mezclas sensibles al contenido de ligante ya que pequeñas variaciones del mismo pueden producir cambios importantes en sus características mecánicas.
- *Discontinuas*: se caracterizan porque en la curva granulométrica del árido falta una fracción o intervalo granulométrico. Son mezclas menos críticas al contenido de ligante pero si se aplican en espesores importantes pueden resultar sensibles a las deformaciones plásticas.

A continuación se describen los tipos de mezclas en caliente más utilizadas en España que resultan de la combinación de los criterios anteriores (Montero, 2010):

- *Hormigones bituminosos en caliente*: son las más utilizadas. Son mezclas en caliente de granulometría continua, las partículas más finas rellenan los huecos que dejan las más gruesas y todas ellas están recubiertas por una película continua de ligante. Esqueleto mineral que incluye las mezclas cerradas y semicerradas, con tamaño máximo superior a 12 mm.
- *Microaglomerados en caliente*: son mezclas cerradas en caliente, finas (tamaño máximo 5-6 mm). Su campo de aplicación son las vías urbanas.

- *Mezclas de alto módulo: son hormigones bituminosos en caliente*, en los que el ligante es un betún duro y que debido a ello presentan un módulo de rigidez superior. Se utiliza en capas de base e intermedias para dotar al firme de mayor resistencia a igualdad de espesor.
- *Mezclas porosas: son mezclas en caliente con un contenido de huecos superior a 20%*, fuerte esqueleto mineral y tamaño máximo de 10-12 mm. El alto contenido en huecos hace que la superficie este libre de agua y que el rozamiento neumático-pavimento sea elevado. Es por ello por lo que se utilizan en capas de rodadura, proporcionando una rodadura cómoda y segura.
- *Microaglomerados discontinuos en caliente: son mezclas cerradas de tamaño máximo de 8-12 mm en las que suele eliminarse la fracción 2-4 mm*. Tienen un buen esqueleto mineral y una fuerte cohesión porque suelen fabricarse con betún modificado o con betunes convencionales y adición de fibras.

2.2.3. Propiedades de las mezclas bituminosas.

Las mezclas bituminosas tienen unas características muy distintas dependiendo del tipo de mezcla, de acuerdo con las clasificaciones ya citadas, lo que permite su empleo en muy diversas aplicaciones. Para que prevalezcan las propiedades que interesan en cada caso hay que considerar las cualidades de los materiales constituyentes, su dosificación y las condiciones de fabricación y de puesta en obra de la mezcla.

Las principales propiedades de las mezclas bituminosas son Estabilidad, Resistencia a las deformaciones plásticas, Resistencia a la disgregación, Resistencia a la fatiga, Durabilidad, Resistencia al deslizamiento e Impermeabilidad.

ESTABILIDAD

Es la capacidad de la mezcla para soportar las cargas de tráfico y resistir las tensiones que se van a producir con unas deformaciones tolerables. Esta resistencia mecánica es la suma, de la producida por el rozamiento interno de los áridos y la producida por la cohesión que proporciona el ligante hidrocarbonato.

La estabilidad ha de ser mayor cuanto mayor sea el valor de las cargas a soportar y cuanto más arriba en el firme esta situada la mezcla. Su valor aumenta con el contenido de ligante, debido a que aumenta la cohesión, hasta llegar a un punto a partir del cual el exceso de ligante hace disminuir el rozamiento interno y, en consecuencia, disminuye la estabilidad (Ruiz, 2001).

En laboratorio suele medirse mediante el Ensayo Marshall, NLT-159 (CEDEX, 2000a), para mezclas convencionales gruesas y en el caso de mezclas finas mediante el Ensayo de Hubbar-Field, NLT-160 (CEDEX, 1973).

RESISTENCIA A LAS DEFORMACIONES PLÁSTICAS

El comportamiento viscoelastoplástico de las mezclas bituminosas conduce a que con la aplicación de cargas a baja velocidad y a altas temperaturas se produzca una acumulación de deformaciones de tipo plástico.

Si la mezcla no tiene unas características reológicas adecuadas, así como una correcta relación filler/betún, una adecuada angulosidad del árido, entre otras características, pueden producirse una acumulación de deformaciones plásticas e incluso la fluencia del material.

La manifestación más típica en la carretera de las deformaciones de este tipo son las roderas, deformaciones longitudinales que se suelen producir en la zona de rodada de los vehículos pesados, véase figura 1.



Figura 1. Ejemplo de rodera
Fuente: Tehama county public works

En otras ocasiones, la deformación plástica se pone de manifiesto mediante arrollamientos o resaltos transversales como si el pavimento se comportase como una alfombra arrugada, esto puede ocurrir donde los esfuerzos horizontales son muy fuertes.

En otros casos, la deformación se debe no sólo a una dosificación inadecuada, sino también a una mala adherencia con la capa subyacente.

Para la determinación a nivel de laboratorio de esta resistencia a la deformación plástica, en España se ha utilizado el Ensayo de Pista de laboratorio, NLT-173 (CEDEX 2000c).

RESISTENCIA A LA DISGREGACIÓN

La disgregación se refiere principalmente a la pérdida de partículas por esfuerzos tangenciales. Este fenómeno se produce en las mezclas con un importante esqueleto mineral en las que la resistencia se debe casi exclusivamente al rozamiento interno. Para evitarlo es necesario que la mezcla sea suficientemente cohesiva y además, resistente a la acción del agua.

La resistencia a la acción del agua se ha venido determinando en el laboratorio mediante métodos específicos para cada tipo de mezcla como el ensayo de inmersión-compresión, NLT-162 (CEDEX, 2000b), el ensayo cántabro para mezclas drenantes, NLT-352 (CEDEX, 2000d).

RESISTENCIA A LA FATIGA

Cuando la mezcla bituminosa tiene un comportamiento elástico, a bajas temperaturas y altas velocidades, el paso repetido de cargas con un valor inferior al de rotura, no produce la rotura del firme pero si va produciendo un agotamiento progresivo por fatiga.

El aumento de desplazamiento elástico en la superficie puede conducir a un agrietamiento generalizado conocido como piel de cocodrilo, véase figura 2.



Figura 2. Ejemplo piel de cocodrilo
Fuente: Asphalt institute

Mediante leyes de fatiga, que se pueden estudiar en laboratorio mediante ensayos dinámicos de carga, y las condiciones de la mezcla, dentro del conjunto de firme del que forma parte, se puede calcular el número de aplicaciones de carga que produce la rotura de la capa construida con la mezcla bituminosa que se vaya a utilizar.

DURABILIDAD

Las capas de rodadura se ven sometidas a diversas agresiones externas como la radiación solar, la acción oxidante del aire y del agua, y la helada. Todos estos factores afectan a la durabilidad de la mezcla.

El envejecimiento de las mezclas es un fenómeno complejo, las causas que lo producen son muy diversas así como los procesos que se desencadenan.

Algunos de los procesos son irreversibles y se ponen de manifiesto en forma de microfisuras y migraciones de ligante, entre otras.

La durabilidad de una mezcla está directamente relacionada con un correcto diseño y el respeto a las reglas de buena práctica en la fabricación y puesta en obra.

Hay varios procedimientos de ensayo que generalmente consisten en un sistema de envejecimiento unido a un ensayo mecánico que se realiza sobre el material envejecido y no envejecido.

RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO

Las mezclas bituminosas empleadas en las capas de rodadura deben proporcionar una adecuada resistencia al deslizamiento que ha de mantenerse en el tiempo.

En la resistencia al deslizamiento intervienen varios factores, (Ruiz, 2001): la macrotextura de la capa, la microtextura y la capacidad de eliminación de agua.

La macrotextura influye fundamentalmente en la resistencia al deslizamiento a velocidades elevadas y viene definida por el tamaño máximo del árido y por la cantidad de mortero. Se mide en campo mediante “Medida de la macrotextura superficial de un pavimento por la técnica volumétrica. NLT-335/00”.

La microtextura se debe fundamentalmente a la textura superficial de los áridos gruesos de la mezcla y se mide en el laboratorio mediante el coeficiente de pulimento acelerado (CPA).

La capacidad de eliminación del agua depende del porcentaje de huecos en mezcla y de la macrotextura. Se mide en campo o laboratorio mediante drenómetro.

IMPERMEABILIDAD

Las mezclas bituminosas de las capas superiores deben proteger la infraestructura frente a la acción del agua que cae sobre el firme. La impermeabilidad puede confiarse directamente a la capa superior (rodadura) o bien a la capa inmediatamente inferior (intermedia) y construir sobre ella una capa de rodadura que permita en mayor o menor medida el paso del agua, como es el caso de las mezclas drenantes.

2.2.4. Diseño de mezclas bituminosas en caliente

El diseño de mezclas bituminosas es la fase que sigue a la de proyecto de la mezcla, en la que se han seleccionado el tipo de mezcla, los materiales básicos y el espesor de capa adecuados a las condiciones de proyecto (Ruiz, 2001).

La dosificación abarca la caracterización y definición de los materiales que componen la mezcla, la determinación de las proporciones de los distintos materiales componentes para obtener la máxima durabilidad, la preparación de la fórmula de trabajo y la comprobación y ajuste de la fórmula en planta.

Las características buscadas pueden ser varias. Dependen del tipo de mezcla y sus constituyentes, de la posición de la capa en el firme, del tipo de firme, de la capa sobre la que se apoye, del tipo de tráfico y de las condiciones climáticas.

Los métodos de proyecto y dosificación de mezclas bituminosas en España han venido desarrollándose desde el comienzo del empleo de estos materiales y han pasado por varias etapas. Inicialmente se adoptaron los del Instituto del Asfalto Norteamericano para hormigones bituminosos basados en el ensayo Marshall, (Asphalt Institute, 2003).

El método Marshall fue desarrollado por Bruce Marshall, ingeniero de carreteras del estado de Mississippi, USA, a finales de los años 1930. En 1943 este ensayo fue adoptado y modificado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos. Desde entonces el método ha permanecido prácticamente sin modificaciones, ya que estas se han referido únicamente a los criterios de análisis de los resultados y a la introducción de ensayos complementarios. Este método es el más extendido en todo el mundo para la dosificación de mezclas.

Se realiza según el procedimiento de ensayo descrito en la Norma NLT-159 (Resistencia a las deformaciones plásticas empleando el aparato Marshall) (CEDEX, 2000a). El ensayo consiste en la fabricación de una serie de probetas cilíndricas de mezclas bituminosas, mediante la aplicación de un número determinado de golpes por cara con un sistema de compactación, que mantienen la granulometría y difieren en el porcentaje de ligante. Se suelen utilizar al menos cinco contenidos de ligante variando de uno a otro en el 0,5%. Las probetas se sumergen en un baño de agua a 60°C. Posteriormente se realiza la rotura de las probetas a compresión y con una velocidad de desplazamiento constante mediante unas mordazas semicirculares apoyadas en la cara cilíndrica de la probeta.

En el análisis se consideran los resultados de las determinaciones volumétricas sobre las probetas compactadas (densidad, huecos en mezcla y huecos en árido), los resultados del ensayo mecánico a rotura (estabilidad y deformación Marshall) y criterios adicionales como la relación filler/ betún. Como resultado del ensayo se determina el contenido de ligante que cumple las especificaciones establecidas.

Para ajustar los resultados del ensayo Marshall se incluían una serie de ensayos mecánicos como el ensayo de resistencia a la deformación plástica mediante la pista de ensayo en laboratorio, NLT-173 (CEDEX 2000c) y el ensayo de inmersión-compresión, NLT-162 (CEDEX, 2000b).

2.3. MERCADO CE: NORMATIVA EUROPEA. CAMBIOS EN EL PG-3

El 1 de marzo de 2008 entró en vigor el Mercado CE para la libre circulación de productos de construcción en el mercado interior de la Unión Europea.

El Mercado CE colocado en un producto de construcción, representa el respaldo de la “aptitud” del producto para el uso previsto y significa que el producto es conforme con una normativa o un DITE (Documento de Idoneidad Técnica Europeo), y asegura que cumple con los aspectos relativos a seguridad, salubridad y protección del medioambiente, (Potti, 2007). Por lo que este mercado no es una “marca de calidad” y tampoco respalda el buen empleo y manipulación del producto, ni el diseño correcto de la obra civil o edificación en la que deba ser empleado.

En el Real Decreto 1630/1992 y en el Real Decreto 1382/1995 se dictan disposiciones para la libre circulación de productos de construcción, en aplicación de la Directiva 89/106/CEE, modificada por la Directiva 93/068/CEE, incluyendo la documentación que han de aportar los fabricantes de productos de construcción para demostrar el correcto cumplimiento del mercado CE (Ministerio de Fomento, 2008).

Hasta ese momento no se disponían de unos criterios normalizados que agrupasen de manera común los diferentes tipos de mezclas asfálticas que se desarrollaban en cada uno de los estados miembros y que disponían de características y normalización individuales. Es por ello por lo que surge la necesidad de armonizar las mezclas bituminosas empleadas en todos los países de la UE.

En consecuencia, España al igual que el resto de los países de la UE, debe adaptarse a estas normas armonizadas.

El Comité Europeo de Normalización (CEN) recoge la normativa europea en dos series de normas: EN-13108 y EN-12697.

La serie de normas **EN-13108** son normas de carácter obligatorio y tienen por objeto establecer las especificaciones de las mezclas bituminosas. En ella se encuentran los criterios mínimos a exigir en los materiales empleados y en su sistema de producción, es decir, el Ensayo de Tipo Inicial y Control de producción en planta, (Rubio, 2007).

En esta norma se recogen las especificaciones para 7 tipos de mezclas bituminosas en caliente, de las cuales, las relativas a hormigones asfálticos, EN 13108-1, mezclas bituminosas para capas delgadas, EN 13108-2, y mezclas bituminosas drenantes, EN 13108-

7, se corresponden con las mezclas bituminosas en caliente de empleo generalizado en España, recogidos en los artículos 542 y 543 del PG-3.

El resto de tipos de Mezclas Bituminosas en caliente; las mezclas bituminosas “Hot Rolled Asphalt” EN 13108-4, “Stone Mastic Asphalt” EN 13108-5, “Sofá Asphalt” EN 13108-3, y “Mastic Asphalt” EN 13108-6, prácticamente no se utilizan en España, siendo su uso más habitual en Gran Bretaña, Alemania y Países Nórdicos.

La norma EN 13108-8 se refiere a los materiales bituminosos para reciclar procedentes de pavimentos bituminosos fresados. En las normas EN 13108-20 y EN 13108-21 se recogen los sistemas de evaluación de la conformidad de las mezclas bituminosas; en la EN 13108-20 se indican las propiedades y los métodos de ensayo y en la EN 13108-21 los requerimientos para evaluar el sistema de calidad en el control de producción.

A su vez estas especificaciones indican el correspondiente método de ensayo para evaluar cada propiedad que se recogen en la serie de normas **EN-12697**. En esta serie de normas aparecen 43 métodos de ensayo de mezclas bituminosas. Estos métodos de ensayo han pretendido englobar los métodos de los diferentes países, pudiendo en numerosos casos elegirse entre varias posibilidades, lo que obliga a cada país a establecer condiciones de fabricación de las probetas y el procedimiento de ensayo.

La experiencia española en el diseño, control y comportamiento posterior en obra de las mezclas bituminosas ha tenido como referencia las normas NLT (elaboradas por el Laboratorio de Transportes y Mecánica de Suelos del Centro de Estudios y Experimentación del Ministerio de Obras Públicas, CEDEX), posteriormente las normas UNE y más recientemente, en la fabricación de mezclas bituminosas, las normas UNE-EN, (Potti, 2007). La entrada en vigor de esta nueva normativa europea ha supuesto en algunos casos ligeras modificaciones respecto a las normas NLT pero otras de ellas implican la sustitución de ensayos ampliamente utilizados en España por otros nuevos no empleados hasta el momento.

Esta obligación de caracterizar las mezclas bituminosas mediante unos ensayos diferentes a los que se venían empleando en España, conlleva necesariamente el cambio de las prescripciones técnicas obligatorias, pues se deben establecer también respecto a los nuevos ensayos. En el ámbito nacional, implica en concreto, la revisión de los artículos 542 y 543 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) (Ministerio de Fomento, 2008). El Mercado CE afecta únicamente a la fabricación de mezclas bituminosas y no a los procedimientos de puesta en obra. Esto supone que estas normas no sustituyen completamente a los artículos 542 y 543, del PG-3.

Se mantienen las mismas mezclas que las incluidas en la orden FOM/891/2004, pero con las nomenclaturas nuevas derivadas de las normas europeas y expresado sus propiedades respecto de los nuevos ensayos.

Por adaptación a la nomenclatura europea, el **artículo 542** pasa a titularse “**Mezclas Bituminosas en caliente tipo hormigón bituminosas**”. Se cambia la designación de las mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso, para adaptarse a la norma UNE-EN 13108-1 (AENOR, 2008a).

A este grupo pertenecen las antiguas mezclas continuas tipo D, S y G que cambian su denominación, véase tabla 1.

Denominación UNE-EN 13108-1	Denominación anterior
AC 16 D	D12
AC 22 D	D20
AC 16 S	S12
AC 22 S	S20
AC 32 S	S25
AC 22 G	G20
AC 32 G	G25

Tabla 1. Designación mezclas bituminosas tipo Hormigón Bituminoso

donde

AC	D	surf/bin/base	ligante	granulometría
----	---	---------------	---------	---------------

AC: indica que la mezcla es de tipo hormigón bituminoso.

D: tamaño máximo del árido, expresado como la abertura del tamiz que deja pasar entre un 90 y 100% del total del árido.

surf/bin/base: indica en que capa se va a emplear la mezcla; rodadura (surf), intermedia (bin) o base.

Ligante: designación del tipo de ligante hidrocarbonato utilizado.

Granulometría: D para mezclas densas; S para mezclas semidensas; G para las gruesas.

Los husos granulométricos pasarán a definirse respecto de una serie de tamices diferentes, la serie de tamices básica+1 definida en la norma de áridos UNE-EN 13043 (AENOR, 2004a).

En la norma 13108-1 (AENOR, 2008a), la estabilidad y deformación del ensayo Marshall sólo se exige para aplicación en aeropuertos y no está considerada para las mezclas bituminosas de aplicación en carreteras. Por lo tanto desaparecen del PG-3 las especificaciones de la estabilidad y la deformación Marshall.

Las propiedades establecidas como relevantes y que se deben evaluar en el diseño de la mezcla son: el contenido de huecos, UNE-EN 12697-8 (AENOR, 2003a), la sensibilidad al agua, UNE-EN 12697-12 (AENOR, 2009), (desaparece el ensayo de inmersión-compresión NLT-162 (CEDEX, 2000b) y la resistencia a las deformaciones plásticas mediante el ensayo de

rodadura, UNE-EN 12697-22 (AENOR, 2008d), (desaparece el ensayo en pista NLT-173 (CEDEX, 2000c).

En el **artículo 543** quedan incluidas las mezclas específicas para capas de rodadura: **“Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas.”**

Se cambia la designación de las mezclas bituminosas tipo discontinuas, UNE-EN 13108-2 (AENOR, 2008b), véase tabla 2:

Denominación UNE-EN 13108-2	Denominación anterior
BBTM 8 A	F 8
BBTM 11 B	F10
BBTM 8 B	M8
BBTM 11 B	M10

Tabla 2. Designación mezclas bituminosas tipo discontinuo

donde

BBTM	D	Clase	ligante
------	---	-------	---------

BBTM: grupo a que pertenecen, tipo discontinuo.

D: tamaño máximo del árido, expresado como la abertura del tamiz que deja pasar entre un 90 y 100% del total del árido.

Clase: A, del 25-35% pasa por el tamiz 2mm; B, del 15-25% pasa por el tamiz 2mm

Ligante: designación del tipo de ligante hidrocarbonato utilizado.

Las propiedades que se deben determinar para la dosificación y composición de la fórmula de trabajo son: el contenido de huecos, UNE-EN 12697-8 (AENOR, 2003a), la sensibilidad al agua, UNE-EN 12697-12 (AENOR, 2009), y la resistencia a deformación plástica mediante el ensayo de rodadura, UNE-EN 12697-22 (AENOR, 2008d).

Las mezclas drenantes, UNE-EN 13108-7 (AENOR, 2008c), pasan a tener la siguiente nomenclatura:

PA	D	Ligante
----	---	---------

PA: indica que la mezcla bituminosa es drenante.

D: tamaño máximo del árido, expresado como la abertura del tamiz que deja pasar entre un 90 y 100% del total del árido.

Ligante: designación del tipo de ligante hidrocarbonato utilizado.

En este tipo de mezclas las propiedades que se deben determinar para la dosificación y composición de la fórmula de trabajo son: el contenido en huecos, UNE-EN 12697-8 (AENOR, 2003a), la sensibilidad al agua, UNE-EN 12697-12 (AENOR, 2009), y la pérdida de partículas,

UNE-EN 12697-17 (AENOR, 2007c), y el escurrimiento de ligante, UNE-EN 12697-18 (AENOR, 2006a).

2.4. EFECTO DEL AGUA SOBRE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

Este apartado tiene como objetivo el estudio del efecto que produce el agua sobre las mezclas bituminosas. En primer lugar se define el significado de daño producido por el agua, se describen los mecanismos que lo producen así como las manifestaciones que tienen en el firme. A continuación se detallan los factores que influyen en este tipo de deterioro y sus posibles tratamientos. Para finalizar se lleva a cabo un estudio de los distintos métodos de ensayo que se utilizan para su evaluación, centrándose en los más utilizados en España.

2.4.1. Definición

El daño producido por el agua en mezclas bituminosas, se puede definir como el deterioro de la capacidad estructural de la mezcla causada por la presencia de agua en estado líquido o gaseoso en el interior de su microestructura (Kiggundu et al., 1988.).

Principalmente el daño producido por el agua es causado por una pérdida de cohesión en la mezcla y/o una pérdida de adhesión entre el ligante y los áridos (conocido como “**stripping**” o “**pérdida de recubrimiento**”) (Asphalt Institute, 2007; Breakah et al., 2009; Caro et al., 2008).

2.4.2. Mecanismos de los daños producidos por el agua

El daño producido por el agua en las mezclas bituminosas en caliente, puede ser causado por la pérdida de adhesión entre el ligante y los áridos (conocido como “stripping” o “pérdida de recubrimiento”) así como por la pérdida de cohesión en la mezcla. Se puede diferenciar entre fallo adhesivo y fallo cohesivo.

El *fallo adhesivo* ocurre entre el ligante y el árido. Cuando el agua penetra en la interfase entre el árido y el ligante, se reduce el contacto entre los dos materiales y causa un fallo de adherencia (Viswanathan, 2005; Arambula, 2007).

El *fallo cohesivo* tiene lugar dentro del ligante (Asphalt Institute, 2007), reduce la fuerza de cohesión del aglutinante del ligante (los enlaces entre las moléculas de ligante se rompen), da lugar a su dispersión o pérdida de concentración y causa una reducción máxima en la rigidez de la mezcla. También puede ocurrir una ruptura de los enlaces árido-a-árido por la acción del agua (relacionado directamente con la solubilidad de los áridos).

Algunos investigadores (Kanitpong, K et al., 2003; Terrel, R.L. et al., 1994), consideran que los daños por humedad en las mezclas bituminosas en caliente se deben más a un fallo adhesivo

que a un fallo cohesivo, a pesar de ello otros investigadores sugieren que la probabilidad de que se produzca un fallo cohesivo es mayor.

Sin embargo, dado que el mecanismo de fallo cohesivo lleva, en última instancia, a un fallo adhesivo, la mayoría de los casos de fallo cohesivo sólo pueden deducirse en lugar de observar, y el mecanismo final, es decir, el adhesivo, se indica como la causa. Así, aunque la definición de daño producido por el agua en mezclas bituminosas, ha sido considerado como el fallo de las uniones adhesivas y cohesivas entre el ligante y los áridos en presencia de agua, se ha demostrado que es difícil de distinguir entre ambos modos de fallo, a menos que la superficie de fallo en la mezcla bituminosa se inspeccione visualmente a posteriores (Sunghwan et al., 2005).

Los mecanismos que contribuyen al daño producido por el agua, son el desprendimiento, desplazamiento, emulsificación espontánea, presión en los poros, lavado hidráulico, así como el pH del agua, estos pueden actuar por separado o de forma conjunta (Shah, 2003; Bagampadde et al., 2004; Solamanian et al., 2003). A continuación se realiza una breve descripción de cada uno de ellos:

- *Desprendimiento* (Detachment): es la separación microscópica de la película de ligante de la superficie del árido por una delgada capa de agua sin la ruptura obvia de la película de ligante.
- *Desplazamiento* (Displacement): se produce cuando el ligante es eliminado de la superficie del árido por el agua. En comparación con el desprendimiento, el agua libre llega a la superficie del árido a través de una rotura en la capa del ligante. La rotura se produce en los puntos de contacto con los áridos. El origen de la ruptura puede ser debida a un revestimiento incompleto de los áridos durante la mezcla, a partículas de polvo en los áridos, debido a las cargas producidas por el tráfico o por condiciones ambientales como ciclos de congelación-descongelación (Little et al., 2003; Viswanathan et al., 2005; Kiggundu et al., 1988).
- *Emulsificación espontánea*: se produce cuando se forma una emulsión invertida de gotas de agua en la mezcla. Esto puede ocurrir cuando se encuentran presentes minerales de la arcilla u otro tipo de aditivos (Asphalt Institute, 2007) Hay dos tipos de emulsiones posibles entre el agua y el ligante. La primera es la típica emulsión asfáltica donde el aceite/ligante esta disperso en agua. La segunda es una emulsión invertida donde el agua esta dispersa en el ligante. Este mecanismo puede debilitar el enlace ligante-ligante debido a la presencia de agua en el ligante.
- *Presión en los poros*: si el agua queda atrapada en los huecos de aire de la mezcla y la temperatura aumenta así como las cargas producidas por el tráfico, la evaporación del agua genera suficiente presión pudiendo ocasionar la ruptura de la película de ligante (Qing et al., 2005).

- *Lavado hidráulico*: es debido al movimiento de los neumáticos sobre la superficie saturada del firme (Qing et al., 2005; Caro et al., 2008; Mehrara et al., 2011). Cuando la rueda de un vehículo pesado se mueve sobre un firme saturado, el agua es presurizada dentro de los espacios vacíos del firme, delante de la carga móvil e inmediatamente aliviada detrás de ella. Así, el ligante se elimina de las capas superficiales, donde la carga impuesta por tráfico es la más alta, (Kim et al., 2004). Este ciclo de compresión-tensión es probable que contribuya a la pérdida de la película de ligante de la superficie total. Teniendo en cuenta que las capas inferiores de firme están sometidas a exposición prolongada al agua, y estas capas están en tensión bajo la aplicación de cargas de tráfico, se podría pensar que la pérdida de recubrimiento comienza en las capas inferiores y progresa hacia arriba (Kandhal et al., 2001b).
- *pH del agua de contacto*: afecta a la adherencia entre el árido y el ligante. La estabilización del pH en la interfase árido-ligante puede minimizar la ruptura del enlace, proporcionar enlaces fuertes y duraderos y reducir la pérdida de recubrimiento (Little et al., 2003).

2.4.3. Modos de transporte del agua en mezclas bituminosas

Los mecanismos de daño producidos por el agua en mezclas bituminosas se inician con los modos de transporte mediante los cuales el agua alcanza el interior de la estructura del material (el agua en estado líquido o vapor se infiltra en la mezcla bituminosa así como al ligante o mástico y alcanza la interfase árido-ligante) y se producen cambios en la estructura interna que conduce a una pérdida de capacidad de carga del material, y culminan con las diversas manifestaciones de este deterioro.

Los fallos adhesivo y cohesivo son el último paso en un proceso que comienza con diferentes modos de transporte del agua y que dan lugar a la generación de los daños producidos por el agua (Caro et al., 2008).

Existen tres modos principales de transporte de agua al interior de las mezclas bituminosas en un pavimento (Hunter et al., 2002; Caro et al., 2008; Breakah et al., 2009) que dependen de las condiciones ambientales y de la estructura de los huecos en la mezcla bituminosas:

- Infiltración de agua líquida desde la superficie del pavimento hacia el interior de la mezcla a través de los huecos interconectados, *permeabilidad*: la permeabilidad puede definirse como la capacidad de un material poroso para permitir el flujo de agua a través de sus huecos. Algunos investigadores (Masad et al., 2006; Mohammad et al., 2003) han llevado a cabo estudios para medir, calcular y simular la permeabilidad. Los resultados de muchos de estos estudios muestran que la estructura de los huecos aire, el tamaño y la granulometría de los áridos así como el espesor de la capa, y procesos de compactación son las variables que afectan la

permeabilidad. Sin embargo, debido a la naturaleza y heterogeneidad de la mezcla bituminosa, no siempre es fácil desarrollar una relación directa entre estas variables y la permeabilidad.

- *Ascensión capilar* de agua líquida proveniente de la superficie inferior de la mezcla (Caro et al., 2008). Ascenso capilar se define como el aumento de un líquido por encima del nivel de presión cero, debido a una fuerza ascendente total producida por la atracción de las moléculas del líquido a una superficie sólida. En los firmes, el ascenso capilar permite que el agua del subsuelo pueda ser transportada a través de los “capilares” formados por los huecos interconectados. La altura final de la columna de agua por encima de la superficie de saturación, así como la tasa de subida, dependerá de: (1) las características geométricas de los capilares, (2) la tensión superficial del agua, (3) la densidad del agua y (4) el ángulo de contacto entre el líquido y sólido.
- *Difusión* del agua líquida y/o vapor de agua a través de los componentes constitutivos de la mezcla: la cantidad de vapor de agua y la velocidad a la que se acumula en una mezcla de bituminosa dependerá de tres factores principales (Caro et al., 2008): (1) humedad relativa, (2) coeficientes de difusión y (3) tipo de almacenamiento y capacidad de almacenamiento (también llamado potencial de retención de agua). La humedad relativa del aire depende de las condiciones ambientales, mientras que el coeficiente de difusión y la capacidad de almacenamiento son propiedades del material. La tasa de almacenamiento y capacidad de almacenamiento dependerá de las propiedades químicas y termodinámicas del material.

2.4.4. Manifestaciones en el firme de los daños producidos por el agua en las mezclas bituminosas

Las manifestaciones en el firme, debidas al deterioro causado por la presencia del agua, son similares a las producidas por otros aspectos como los materiales, el diseño de la mezcla bituminosa, y construcción.

Se produce una reducción de la resistencia en la mezcla bituminosa. La reducción de la resistencia puede contribuir al desarrollo de diversas formas de deterioro del firme, como el agrietamiento y la formación de roderas (Sengoz et al., 2007; Boadu, 2005), reduciendo así la vida del firme (Qing et al., 2005). Muchas veces resulta difícil de identificar porque los indicadores en la superficie pueden llevar años para mostrarse (Shah, 2003).

Los tipos de daños que se pueden presentar (Solamianian et al., 2003) son:

Exudaciones, grietas y roderas: Estas son causadas por una parcial o completa pérdida de adhesión entre la superficie del árido y el ligante. Esto puede ser debido a la presencia de agua en la mezcla por inadecuado secado de los áridos, mal drenaje o una mala

compactación Se ve agravado por la presencia de los ciclos de tráfico y de congelación-descongelación.

Raveling: Otra de las manifestaciones consiste en el desprendimiento progresivo de los áridos de la superficie de la mezcla causado por los neumáticos de los vehículos sobre la mezcla bituminosa. (Qing et al., 2005; Arambula, 2007; Caro et al., 2008). Puede ser causada por una mala compactación, contenido de ligante bajo y/o alto contenido de finos.

2.4.5. Factores que influyen en los daños producidos por el agua

Los daños producidos por el agua en una mezcla bituminosa en caliente, tiene un impacto económico significativo en términos de mantenimiento excesivo y costos de rehabilitación. La sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas dependerá de los efectos combinados de las propiedades del material utilizado, los parámetros de diseño de la mezcla, el nivel de tráfico al que se ve sometida y los factores ambientales.

Se van a distinguir entre factores internos y factores externos.

▪ 2.4.5.1 Factores Internos

Los factores internos que influyen en el daño provocado por el agua están directamente relacionados con las propiedades de los materiales que forman la mezcla bituminosa, los áridos y el ligante.

ÁRIDOS

Los áridos constituyen la mayor parte de la mezcla bituminosa (alrededor del 94% en peso) y proporciona la superficie sobre la que el ligante se adhiere. Los áridos varían ampliamente en términos de composición, superficie química, morfología, distribución del tamaño de los poros, entre otros. Por lo tanto el árido ya sea el grueso o el árido fino debe ser examinado cuidadosamente en la evaluación de los daños por el agua (Jahromi, 2009). En la mayoría de los casos, el desprendimiento (*stripping*), tiene lugar en la porción del árido grueso de la mezcla bituminosa, aunque hay otros casos en los que el árido fino es sensible al agua, y el desprendimiento se produce en esta parte de la mezcla (Sengoz et al., 2007).

Las características físicas de los áridos como angularidad, porosidad, forma, textura, superficie juegan un papel importante. Si el árido es angular y tiene una textura áspera, la adhesión con el ligante es mayor que si el árido tiene una textura lisa y redondeada (Cheng et al., 2002), sin embargo si los áridos son muy angulares en algunos casos son difíciles de recubrir uniformemente y sus bordes pueden perforar la película de ligante haciendo que la mezcla sea más susceptible al agua (Abo-Qudais et al., 2007).

La alta porosidad y capacidad de absorción del árido permite que el ligante penetre más profundamente en los poros del árido y mejora la unión ligante-árido. Sin embargo, en

algunos casos es difícil quitar el agua que se encuentra en los poros del árido durante el proceso de secado, lo que es perjudicial (Abo-Qudais et al., 2007).

Cuando el árido tiene un área de superficie alta, va a formar una mejor unión con el ligante ya que la región de contacto entre los dos materiales es mayor. Cuando los áridos están húmedos o cubiertos de polvo, el polvo va a aumentar la viscosidad del ligante y en contacto con agua se rompe el vínculo árido-ligante.

La composición mineralógica del árido en términos de su naturaleza hidrófila e hidrófoba y su afinidad con el ligante, también son importantes (Arambula, 2007). Los áridos están formados en su mayoría, por compuestos inorgánicos polares que difieren en sus propiedades. Los áridos con alto contenido en carbonato (hidrófobo/básico) forman uniones más fuertes con el ligante que los áridos con alto contenido en sílice (hidrófobo /ácido). Así, mezclas bituminosas con áridos calizos, cuyo componente principalmente es el carbonato cálcico (CaCO_3) son más resistentes a los daños por agua. Los áridos calizos, después de la molienda, exponen los iones calcio con características electropositivas, estos iones van a competir con el agua y el ligante. Debido a su carácter básico van a formar enlaces más fuertes con los ácidos del ligante, formando sales hidrófobas. Mezclas bituminosas con áridos con altos contenidos en sílice como el granito o áridos como el basalto, son más susceptibles al agua, debido a que los enlaces que forman con el ligante son más débiles (Bagampadde et al., 2005, Gorkem et al., 2007).

LIGANTE

El betún es una mezcla de compuestos orgánicos en su mayoría hidrocarburos con distintas estructuras y peso molecular, no polares en comparación con los áridos. Además de los hidrocarburos, el betún contiene cierta cantidad de compuestos orgánicos polares. Los compuestos orgánicos polares incluyen ácidos y bases. Hay compuestos orgánicos ácidos como los ácidos carboxílicos y anhídridos. El betún se compone de un número elevado de hidrocarburos con diferentes heteroátomos (nitrógeno, oxígeno y azufre) y/o trazas de metales (por ejemplo hierro, vanadio y níquel). Los heteroátomos forman compuestos (grupos funcionales) heterocíclicos como pirrolidina, piridina, quinolina, sulfóxidos, cetonas y ácidos carboxílicos. Tales grupos funcionales juegan un papel importante en la interacción entre el betún y la superficie de los áridos, y por consiguiente, en la resistencia de las mezclas a los daños producidos por el agua. La resistencia en la unión interfacial árido-ligante, depende de la tendencia de los grupos funcionales a ser absorbidos sobre la superficie de los áridos y a la desorción relativa por el agua. En general, los compuestos polares parecen ser los más fácilmente desplazados por el agua (como los ácidos carboxílicos, sulfóxidos y anhídridos). La resistencia más alta al agua se ha asociado a los fenoles, cetonas y bases nitrogenadas. (Bagampadde et al., 2004; Arambula, 2007).

El ligante en presencia de agua, modifica su consistencia y aumenta su rigidez, el aumento de rigidez causa contracción del ligante sin cambio de volumen, lo cuál puede ser una causa

de stripping. El endurecimiento va a influir en el enlace árido-ligante, debido a los cambios en la composición química que se producen durante el envejecimiento (Curtis et al., 1993).

Los betunes modificados con polímeros, como elastómeros y plastómeros, disminuyen la susceptibilidad al agua de las mezclas bituminosas, con respecto a los betunes base (Gorkem et al., 2009).

El espesor de la película de ligante es otro de los factores a tener en cuenta en los daños causados por el agua, el fracaso adhesivo suele ocurrir cuando las películas de ligante son más delgadas (Arambula, 2007). Sengoz et al (2007), determinaron mediante la Modified Lottman Test, que el intervalo óptimo de espesor de la película de ligante esta entre 9,5 y 10,5 mm.

El grado en el que afecta el betún va a depender de los áridos que se utilicen en la mezcla bituminosa (Lu et al., 2007), por lo tanto el betún es menos dominante, en este sentido, que los áridos (Sengoz et al., 2007).

ENLACE ÁRIDO-LIGANTE

Los áridos y el ligante son los dos principales componentes de una mezcla bituminosa. Cada uno de estos componentes tiene sus propiedades químicas y físicas separadas, como se ha comentado anteriormente. Estas propiedades interactúan entre sí cuando ambos están en contacto. La adhesión entre el árido y el betún es un factor clave que determina la sensibilidad al agua de una mezcla bituminosa (Bhasin, 2006). La reacción química que tiene lugar entre ellos, ha sido generalmente aceptada para explicar por qué diferentes tipos de áridos presentan distintos grados de adherencia con el ligante en presencia de agua (Sunghwan et al., 2005). Las reacciones químicas se producen en el momento del mezclado de ligante y los áridos. A efectos de largo plazo estas reacciones químicas pueden afectar la durabilidad del pavimento. Cuando el ligante esta caliente tiende a entrar en cualquier poro o grieta que posea el árido.

Los áridos proporcionan una superficie heterogénea que presenta varios sitios activos e inactivos que desempeñan un papel importante en la interacción con las moléculas de ligante (Curtis et al., 1993). Los sitios activos del árido contienen cargas que atraen y orientan a los compuestos polares del ligante. Los grupos polares que están presentes en el punto de contacto del ligante y el árido, se adhieren a la superficie debido a fuerzas electrostáticas, fuerzas de Van der Waal o enlace covalente (Caro et al., 2008). Cuando el betún moja a los áridos, en la interfase se produce una adsorción selectiva, seguida por una reacción química entre el material adsorbido y los compuestos de los áridos. En estas condiciones, los componentes ácidos de los materiales bituminosos reaccionan con los áridos básicos para formar compuestos insolubles en agua.

En este contexto, áridos básicos como la caliza, necesitan de los compuestos ácidos del ligante para formar enlaces químicos. Por ejemplo, el carbonato cálcico de la caliza reacciona

con los ácidos carboxílicos del ligante, a altas temperaturas se formarán sales insolubles. Mientras que áridos silicios, como la cuarcita y el granito (Bagampadde et al., 2005), tienen compuestos ácidos que no formarán enlaces con los ácidos del ligante, aunque el ácido puede ser cubierto por el ligante si se aplica suficiente calor y fuerza mecánica durante el mezclado (Asphalt Institute, 2007).

En la mayoría de los casos las mezclas bituminosas están formadas por diferentes tipos de áridos de distinta procedencia, por lo que tendrán también distinta composición química. Hay que tener en cuenta que las moléculas de agua (dipolar) son atraídas a la superficie del ácido con mayor fuerza que los compuestos del ligante (generalmente no polares, aunque contienen algunos componentes polares, como se comentó anteriormente) para satisfacer las demandas de energía en la superficie, por lo tanto el agua tenderá a desplazar el ligante del ácido. Son varios los estudios (Bhasin. 2006; Cheng. et al., 2002; Kim. et al., 2004; Copeland 2007; Howson et al., 2007) que indican que este fenómeno es termodinámicamente favorable. Desde el punto de vista termodinámico es posible cuantificar la calidad de la adhesión del sistema ácido-ligante y su susceptibilidad a la pérdida de adhesión por la presencia de agua mediante el empleo de la Energía Libre Superficial (ELS) de los materiales que están involucrados en el proceso.

PERMEABILIDAD Y HUECOS AIRE

El contenido de huecos aire y la permeabilidad de la mezcla, están influenciados por el contenido de ligante, proporción de los áridos, y grado de compactación.

La permeabilidad puede definirse como la capacidad de un material poroso para permitir el flujo de agua a través de sus huecos (Arambula, 2007). Altos contenidos de huecos de aire en las capas del firme permite la circulación del agua a través estos espacios. Los estudios han demostrado que con un contenido de menos de 4% a 5% de huecos aire, los huecos están por lo general no interconectados y, por lo tanto, son impermeables al agua. Si el firme permanece permeable durante un período de tiempo prolongado, la pérdida por revestimiento (stripping) es probable que ocurra debido a la entrada de agua y a las presiones producidas en el poro inducida por el tráfico (Jonson et al., 2002).

▪ **2.4.5.2 Factores Externos**

Algunos de los factores externos que influyen en el daño producido por el agua son la construcción, la producción, el nivel de tráfico y las condiciones ambientales.

FABRICACIÓN DE LA MEZCLA BITUMINOSA

Los áridos que se emplean para la fabricación de la mezcla bituminosa se encuentran acopiados, si hay exceso de polvo o arcilla sobre ellos, la unión con el ligante no va a ser la adecuada, por lo que los áridos deben mantenerse limpios y separados unos de otros para evitar la contaminación.

También hay que prestar atención a las condiciones climáticas a las que se encuentran expuestos los acopios de los áridos, si llueve el árido puede absorber el agua. Una forma de aliviar esta situación es acopiar los áridos con una ligera pendiente, y en caso de los áridos finos cubrirlos (Asphalt Institute, 2007). Si el árido no se seca de manera adecuada, cuando se mezcla con el ligante, la adhesión va a ser menor en comparación con una superficie seca (Viswanathan, 2005).

El contenido de ligante debe ser el adecuado para que no se produzcan escurrimientos.

La mezcla bituminosa fabricada en planta debe ser trasladada rápidamente para evitar un enfriamiento excesivo (Sunghwan et al., 2005).

PROCESO DE CONSTRUCCIÓN

El proceso de construcción es también importante para crear un firme con buena resistencia a los daños producidos por el agua.

La compactación tiene como objetivo lograr la densidad adecuada durante el extendido de la mezcla bituminosa. Una compactación insuficiente será más susceptible a la entrada de agua. El equipo utilizado para la compactación debe ser el adecuado para evitar la fractura de los áridos; si esto ocurre los áridos que estaban cubiertos de ligante quedan expuestos a las condiciones ambientales. Probablemente, las juntas longitudinales es donde la densidad sea más difícil de alcanzar (Asphalt Institute, 2007; Arambula, 2007, Sengoz et al., 2007).

TRÁFICO

Tanto el tipo como el volumen de tráfico son variables importantes. Cuando el firme se encuentra en un estado saturado, el agua contenida en la mezcla dentro de los huecos puede producir presión que junto con el paso de las ruedas de los vehículos produce estados de tensión-deformación que pueden acelerar la aparición de daños producidos por el agua (Shah et al., 2003, Sengoz et al., 2007).

CONDICIONES AMBIENTALES

Las fluctuaciones de temperatura, los ciclos congelación-descongelación, los ciclos de lluvia-seco así como el pH del agua, son factores que provocan daños.

Cuando la temperatura del aire o el material de base son demasiado bajos, no se aconseja la construcción del firme, ya que la densidad adecuada puede ser difícil de lograr.

Los ciclos de congelación-descongelación producen que el agua que se encuentra dentro de los huecos aumente su volumen y al producirse la descongelación aparecen daños.

Los ciclos de mojado-seco dictan la cantidad de precipitaciones y las fluctuaciones en la capa freática por debajo del firme.

Cuanto mayor es el pH del agua más susceptible son las mezclas bituminosas al agua.

2.4.6. Tratamientos para limitar la susceptibilidad al agua de las mezclas bituminosas en caliente

El agua puede provocar un daño acelerado en el firme que conduce a la reducción de su vida útil. Como consecuencia de ello, disminuye el rendimiento y por consiguiente aumentan los costes de mantenimiento. Para reducir o controlar este problema existen distintos aditivos que se utilizan para aumentar la adhesión entre el árido y el ligante. Existen una gran variedad de tratamientos disponibles para mejorar la sensibilidad al agua que se pueden introducir directamente al ligante como un modificador, o se puede añadir a la mezcla con el árido (Aksoy et al., 2005; Kok et al., 2009).

Los productos químicos que se añaden al ligante son conocidos como *líquidos anti-stripping*. La mayoría contienen aminas que disminuyen la tensión superficial del ligante aumentando la adherencia con el árido, debido a la modificación de la composición química y de la carga eléctrica de la mezcla (Viswanathan, 2005). La mayoría de ellos son catiónicos, lo que promueve la adhesión entre la superficie de los áridos ácidos y el betún. Algunos contienen tanto compuestos catiónicos como compuestos aniónicos, por lo que mejoraran la adhesión con distintos tipos de áridos y ligantes (Qing et al., 2005). Estos aditivos, no cambian las propiedades reológicas del ligante (Kanitpong et al., 2008).

Es importante que estos líquidos sean estables al calor y al almacenamiento (Asphalt Institute, 2007). A altas temperaturas durante largos periodos de tiempo, la eficacia de estos aditivos puede reducirse debido a las distintas reacciones que tienen lugar y que dan como resultado un producto que ya no posee la función inicial. Moghadas et al. (2012) introdujeron en la mezcla un aditivo denominado Zycosoil, que al contrario que las aminas, elimina de forma permanente la superficie sensible al agua. Utilizan como áridos, caliza y granito. El zycosoil produce una capa hidrófoba en el árido, ya que convierte el silano (hidrofilico) en siloxano (hidrófobo), por lo que mejora la adherencia y disminuye la sensibilidad al agua. Aumenta la resistencia a tracción indirecta en un 3% en la mezcla que contiene caliza y en un 14% en la que contiene granito.

Aksoy et al. (2005) utilizaron distintos aditivos que introdujeron al betún. Realizan distintos ensayos sobre el betún y sobre las mezclas bituminosas. Se comprobó que disminuía la sensibilidad al agua de las mezclas a las que se le adicione los aditivos.

Hay estudios que indican que algunos *polímeros* pueden actuar como agantes anti-stripping. Normalmente son mezclados con el ligante en la refinería.

Gorkem et al. (2009) utilizaron en su estudio dos tipos de betunes modificados con polímeros SBS y EAV. Para la mezcla bituminosa se utilizó por un lado árido calizo y por otro una mezcla de áridos tipo basalto y caliza. Se concluye, utilizando el Modified Lottman Test, que el betún modificado con polímeros proporciona una mejor adhesión al árido que la mezcla que utiliza un betún base. Dentro de los áridos utilizados para un mismo tipo de

polímero las mezclas fabricada con árido basalto y caliza, tienen mayor susceptibilidad al agua que las que sólo llevan árido calizo. Esto puede deberse a la formación de un enlace débil entre el basalto y el betún debido al carácter ácido de ambos.

Hay polímeros que se aplican al árido, proporcionando un revestimiento resistente al agua, uniendo tanto el árido como el ligante. Los polímeros se seleccionan para que haya compatibilidad con el ligante y mejore el recubrimiento del árido y el enlace con el ligante (Asphalt Institute, 2007).

Otro de los tratamientos que se utilizan es la *adición de cal*, tanto la cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) como la cal viva (CaO). Son los aditivos que más se utilizan. La cal hidratada se puede adicionar seca sobre el árido seco o húmedo, ésta también se puede utilizar como lechada de cal (mezcla aproximada de 3 partes de agua y 1 parte de cal) sobre el árido seco (Asphalt Institute, 2007) y en las diferentes etapas de la producción de la mezcla. La adición de cal hidratada seca sobre los áridos es más efectiva que la adición de cal en forma de lechada (Kim et al., 2008).

Los iones de calcio de la cal reaccionan con los ácidos carboxílicos del betún y reemplazan algunos de los cationes de la superficie total, provocando una mejor adhesión (Arambula, 2007), en adición la cal hidratada puede reaccionar con la arcilla en los áridos y minimiza el daño causado por el agua debido a estas partículas.

Las mezclas con cal hidratada presentan mejores resultados que las mezclas no tratadas debido a los efectos combinados de aumento de rigidez, resistencia y tenacidad del mastico y mejora de la unión interfacial árido-ligante (Kim et al., 2008).

Movilla-Quesada et al. (2012) demostraron que el uso de cal hidratada como filler en una cantidad adecuada mejora el comportamiento de las mezclas bituminosas en caliente bajo la acción del agua. Para el estudio se utilizaron dos tipos de áridos, distintos porcentajes de filler y dos tipos de betún. Los ensayos llevados a cabo para dicha investigación fueron el ensayo de inmersión-compresión, sensibilidad al agua y ensayo cántabro. Se obtuvo un aumento del 40% en la resistencia conservada con la utilización de este filler.

La cal hidratada tiene distintos efectos dependiendo del árido que se utilice para la fabricación de la mezcla, así Gorkem et al. (2009) comprobó que el efecto es más pronunciado en las mezclas preparadas con basalto que con caliza. Esto puede ser debido a la formación de sales insolubles.

La cantidad de cal hidratada que se utiliza para mejorar la sensibilidad al agua es del orden de 1-2% sobre el peso de los áridos (Viswanathan et al., 2005), aunque el efecto que produce varía con la granulometría de la mezcla bituminosa utilizada (Khodaii et al., 2012; Abo-Qudais, 2007). La adición conjunta de cal y betún modificado con polímero mejora la resistencia de la mezcla a los daños causados por el agua (Kok et al., 2009).

La cal hidratada aumenta el módulo dinámico y la resistencia a la fatiga de la mezcla bituminosa (Huang, J. et al., 2009).

La adición de *cenizas volantes* parecen proporcionar a la mezcla resistencia al agua actuando de forma similar a la cal hidratada, aunque se está investigando sobre ello (Kim et al., 2012).

Mezclas donde los áridos son de alta calidad y el ligante está modificado con polímeros, son bastante resistentes al agua, sin ser tratados con aditivos (Kim et al., 2012).

2.4.7. Ensayos de laboratorio para evaluar la susceptibilidad al agua de las mezclas bituminosas

Los ensayos de laboratorio para evaluar la susceptibilidad al agua, tienen como objetivo reproducir lo máximo posible los efectos que produce el agua en el firme.

Son muchos los métodos de ensayo que han sido desarrollados para determinar la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas en caliente, proporcionando una medida cualitativa o cuantitativa.

A continuación se mencionarán detalladamente algunos de los métodos de ensayo que se utilizan.

Entre ellos podemos diferenciar los que se realizan sobre la mezcla bituminosa sin compactar y los que se llevan a cabo sobre la mezcla bituminosa compactada (Airey et al., 2002; Copeland, 2007; Solamianian et al., 2003).

▪ 2.4.7.1. Métodos de ensayo sobre mezcla bituminosa sin compactar

Los métodos de ensayo sobre la mezcla bituminosa sin compactar, por lo general implican la inmersión de la mezcla suelta en agua (o en una solución química) bien a temperatura ambiente o a una temperatura elevada durante un período determinado de tiempo, y la evaluación de la separación del betún del árido mediante inspección visual. Son pruebas cualitativas, por lo tanto son bastante subjetivas y dependen de la experiencia e interpretación de la persona que las realiza (Arambula, 2007).

➤ *Boiling water test* (ASTM, 2005)

Este método de ensayo consiste en colocar una muestra de mezcla bituminosa en caliente sin compactar en agua hirviendo durante 10 minutos, agitando con una varilla de vidrio. Después de hervir, la mezcla se seca y se observa la superficie total del árido que conserva el recubrimiento original después de la ebullición. Si el recubrimiento es inferior al 95%, se considera que la mezcla bituminosa es susceptible al agua. Este método de ensayo sólo refleja la pérdida de adherencia y no contempla la pérdida de cohesión. Además, es difícil determinar la pérdida de recubrimiento porque los áridos finos son difíciles de ver.

➤ *Static Immersion test (ASTM, 1985)*

Es similar Boiling water test. La mezcla bituminosa se sumerge en agua destilada a 25° C durante un periodo de tiempo de 16-18 horas. La evaluación visual se realiza mientras que la mezcla todavía esta sumergida en agua. Se determina si el recubrimiento es inferior o superior al 95%.

➤ *Adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos en presencia de agua (CEDEX, 1992)*

Método de ensayo utilizado en España análogo al Static Immersion test. La mezcla es sumergida en agua a temperatura ambiente (aproximadamente 25°C) y se deja en reposo durante 16 a 18 horas. Se estima visualmente el porcentaje de área total visible del árido cubierto por el ligante como mayor o menor del 95%.

➤ *Determinación entre la afinidad entre áridos y ligantes (AENOR, 2007b)*

Esta norma europea estipula procedimientos para la determinación de la afinidad entre el árido y el betún. Dentro de ella, el Procedimiento A: Método de la Botella Giratoria, expresa la afinidad mediante el registro visual del grado de revestimiento de betún sobre partículas de árido sin compactar recubiertas de betún, después de ser sometidas a la influencia de agitación mecánica en presencia de agua.

➤ *Net Adsorption Test (NAT)*

Fue desarrollado por Curtis et al. (1993). Se utiliza como un procedimiento de selección para elegir betunes y áridos, así como para determinar la eficacia de los aditivos “anti-stripping”, como parte del método de diseño Superpave (Airey et al., 2002). Se centra en la unión entre los áridos y ligantes asfálticos. El ensayo se basa en medir la relación físico-química (isotermas de adsorción) de la cantidad de betún adsorbido a partir de una solución en el árido. Para ello, se añade una solución de betún en tolueno sobre la mezcla y se mide la cantidad de betún disuelto que se adsorbe sobre la superficie del árido, seguido de la cantidad que es eliminado por la adición de agua. Si la cantidad de betún adsorbido es superior al 90%, el betún y el árido se consideran que son compatibles. El sistema se considera incompatible si el betún retenido es inferior al 70%, mientras que la compatibilidad es cuestionable entre 70-90%.

▪ **2.4.7.2. Métodos de ensayo sobre mezclas bituminosas compactadas**

Son varios los ensayos que se llevan a cabo sobre las mezclas bituminosas compactadas, ya sean fabricadas en laboratorio o mediante la extracción de testigos del firme. Implican la medición de un cambio en las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas compactas, después de la inmersión en agua. Se trata de métodos cuantitativos, la relación entre las muestras acondicionadas y no acondicionadas se utiliza para estimar la

susceptibilidad al agua de la mezcla comparando con un valor prescrito como umbral. Si el valor obtenido de la realización del ensayo es inferior al valor umbral, la mezcla se clasifica como susceptible al agua.

Entre estos ensayos nos encontramos con los siguientes:

➤ *Modified Lottman Test (Asphalt Institute, 2007; AASHTO, 2000)*

Es el ensayo más utilizado en EEUU. Las probetas pueden ser compactadas utilizando un compactador Marshall o un compactador giratorio. Se fabrican 6 probetas que se dividirán en dos grupos (3+3), con un contenido de huecos aire similar. Un grupo será el de control, es decir, el que no está acondicionado. Las probetas de este grupo, se mantendrán a temperatura ambiente. Inmediatamente antes de comenzar el ensayo se sumergen en agua, pero metidas en bolsas de plástico, a 25°C. El otro grupo es saturado sumergiendo las probetas en agua y aplicando vacío, durante un periodo de tiempo determinado hasta alcanzar un nivel de saturación que se encuentre entre el 70-80%. Este grupo se somete a un ciclo de congelación-descongelación, introduciendo las probetas en bolsas con agua en un congelador a -18°C durante 16 horas como mínimo. Pasado este tiempo se introducen en un baño de agua durante 24 horas a 60°C, y finalmente, 2 horas antes de la rotura de las probetas, se ponen a 25°C. La susceptibilidad al agua se determina mediante el cálculo de la relación de resistencia a tracción (TSR) de las probetas no acondicionadas y las acondicionadas. Las probetas rotas a tracción indirecta son inspeccionadas de manera visual para estimar la pérdida de recubrimiento que se ha producido tras el acondicionamiento. La mayoría de los organismos utiliza un valor de TSR de 0.80 (algunos lo identifican con 80%) como aceptable, aunque hay otros organismos que el valor que consideran aceptable es de 0.70. Este ensayo tiene sus limitaciones en cuanto a la predicción de la susceptibilidad al agua con confianza (Solamanian et al., 2003).

➤ *Immersion-Compression Test (ASTM, 2007)*

Se basa en la medición de la resistencia a compresión. En este ensayo el índice de fuerza retenido (IRS) se obtiene mediante la comparación de la resistencia a compresión de probetas de dos grupos de probetas (uno seco y otro húmedo). Un grupo se mantiene a temperatura ambiente y se pone a 25°C antes de la rotura. El otro grupo se sumerge en un baño de agua caliente a 60°C durante 24h (o 4 días a 49°C) y luego se acondicionan en agua a 25°C durante 4 horas. El criterio de aceptación vendrá dado por la relación de fuerzas retenidas a compresión entre las muestras acondicionadas y las no acondicionadas. El instituto del Asfalto recomienda que las mezclas deben ser rechazadas si IRS es menor o igual a 0.75. En España este ensayo es desarrollado por la NLT-162 (CEDEX, 2000b).

➤ *Tunncliff and Root test* (ASTM, 2009)

Se fabrican seis probetas con un contenido en huecos aire entre 6 y 8 por ciento. Las seis probetas se dividen en dos grupos de tres. El primer grupo es el grupo de control sin ningún tipo de acondicionamiento. El segundo grupo se introduce en un sistema de vacío. Después de la saturación, se colocan en un baño de agua durante 24 horas a 60 ° C. Antes de la rotura se ponen a 25° C. El TSR mínimo aceptable que se utiliza es de 0,7 a 0,8.

➤ *Sensibilidad al agua* (AENOR, 2009),

En este ensayo europeo en el método A, se fabrican seis probetas cilíndricas que se dividen en dos grupos de tres y se acondicionan. Un grupo se mantiene seco a temperatura ambiente, mientras que el otro grupo se satura y se sumerge en agua a una temperatura de 40°C durante un periodo de 68-72 horas. Tras el acondicionamiento, la fuerza de tracción indirecta de cada uno de los grupos se determina de acuerdo con la norma EN 12697-23 (AENOR, 2004b) a la temperatura de 15°C. Se determina la relación de la resistencia a tracción indirecta (ITSR) del grupo condicionado en agua, comparando con el del grupo seco, y se expresa en porcentaje.

Los ensayos que se han descrito anteriormente, no tienen en cuenta el efecto del paso de tráfico en los daños producidos por el agua, sin embargo existen otros tipos de ensayo que sí lo tienen en cuenta como es el caso del Hamburg Wheel Tracking Device y *Environmental conditioning System*, que se describen a continuación:

➤ *Hamburg Wheel Tracking Device (HWTD)* (Hunter et al., 2002; Asphalt Institute, 2007)

Se utiliza para predecir la deformación permanente y el daño producido por el agua en las mezclas bituminosas en caliente. Las probetas fabricadas se someten al paso de una rueda mientras están sumergidas en agua. Se representa la profundidad de la rodera en función del número de pasadas. Los resultados suelen mostrar una curva, en la que se pueden distinguir dos partes, la primera parte es la pendiente de deformación y la segunda parte comienza cuando hay un aumento repentino en la velocidad de deformación, éste punto es conocido como “punto de inflexión stripping”. El número de pasadas necesarias para alcanzar el punto de inflexión se utiliza como una medida relativa de la susceptibilidad a que se produzca pérdida por recubrimiento.

Izzo et al. (1999) desmotaron que este dispositivo tiene una buena repetibilidad para probetas fabricadas con distintos métodos de compactación, en concreto para probetas rectangulares fabricadas mediante compactador de rodillo y probetas cilíndricas obtenidas mediante compactador giratorio Superpave.

Hay otras versiones de este tipo de dispositivos como PURWheel y Asphalt Pavement Analyzer (APA), cuyo mecanismo de trabajo es similar al ensayo HWDT (Qing et al., 2005).

➤ *Environmental conditioning System (ECS)*

Fue desarrollado por la Universidad de Oregon a través del programa SHRP (Strategic Highway Research). Tiene una amplia capacidad para simular condiciones de campo. Se determina la susceptibilidad al agua de las mezclas bituminosas compactadas, sometiéndolas a diferentes temperaturas así como niveles de saturación y carga dinámica (Terrel et al., 1994). Consiste en 3 subsistemas: acondicionamiento del fluido, cámara de acondicionamiento ambiental y un sistema de carga. En la cámara ambiental se aloja un bastidor de carga que esta conectado al sistema de acondicionamiento del fluido. Los lados de la probeta son sellados mediante una membrana para realizar el vacío. En primer lugar, a la probeta en seco se le determina el módulo resiliente y la permeabilidad. A continuación, se pasa el agua a través de la muestra y se aplicando vacío. La muestra saturada se somete a ciclos térmicos y se determina el módulo resiliente así como la permeabilidad. Los ciclos térmicos a los que se ve sometida la probeta consta de tres ciclos a 60°C durante 6 horas y un ciclo de congelación a -18°C durante 6 horas. Después de cada uno de estos ciclos, la probeta se acondiciona a 25°C durante dos horas y se determina el módulo resiliente y la permeabilidad al agua.

Después de su desarrollo inicial, fue revisado para resolver algunas de sus deficiencias. La relación del módulo resiliente de las probetas acondicionadas y no acondicionadas debe ser mayor de 0,8 para que la mezcla bituminosa se considere apta.

Cada vez son más los estudios que se llevan a cabo sobre métodos de ensayo distintos a los comentados anteriormente, o la combinación de algunos de ellos, que pretenden cuantificar con mayor precisión los daños causados por el agua. Con tal fin, investigadores de Nottingham Transportation Engineering Centre (NTEC) utilizan el ensayo conocido como Saturation Ageing Tensile Stiffness (SATS) que combina el envejecimiento oxidativo y los daños producidos por el agua en el acondicionamiento de las probetas, antes de realizar los ensayos mecánicos. El ensayo consiste en saturar las probetas antes de introducirlas en agua a una determinada temperatura y con alta presión, durante un determinado tiempo. A continuación se mide el módulo de rigidez después del ensayo y se compara con el módulo de rigidez de las probetas no acondicionadas, se conoce como “módulo de rigidez retenido”. En el estudio realizado utilizaron distintos tipos de áridos, ligantes así como distintos contenidos de huecos en la mezcla. Los resultados muestran que la prueba SATS es capaz de discriminar entre mezclas bituminosas distintas en términos de su resistencia a los daños producidos por el agua (Airey et al., 2008; Grenfell et al., 2012).

Poulikakos et al. (2009) emplean el método de ensayo denominado CAST (Coaxial Shear Test), ensayo de fatiga, para evaluar la sensibilidad al agua de mezclas bituminosas porosas. En el, se aplica una carga perpendicular a la muestra que esta sometida a un confinamiento lateral y sumergida en agua. Los resultados obtenidos se comparan con los que proporciona el ensayo de sensibilidad al agua. Los datos obtenidos mediante el ensayo CAST aportan más

información sobre el comportamiento del material que los que proporcionan los valores de ITSR.

Breakah et al. (2009) proponen el uso del Dynamic Modulus Test para evaluar la susceptibilidad al agua de las mezclas bituminosas en caliente. Determinan el módulo dinámico en muestras acondicionadas y sin acondicionar. Los resultados obtenidos muestran coherencia con el Modified Lottman Test en la identificación de la sensibilidad al agua de la mezcla estudiada.

Chen et al. (2008) evalúan el daño causado por la humedad en una mezcla bituminosa densa usando betunes con y sin aditivos y áridos gruesos con diferente angularidad. Los métodos de ensayo utilizados para el estudio son Simple performance test (SPT) y Superpave indirect tensile test (IDT). El acondicionamiento de las probetas se realiza de cuatro maneras distintas (a) un ciclo de congelación-descongelación (FT), (b) dos ciclos de FT, (c) 500 ciclos de pulsos de presión de poros con Moisture Induced Stress Tester (MIST), y (d) 1000 ciclos con MIST. MIST fue desarrollado para simular las condiciones que ocurren en los poros de la mezcla bituminosa cuando esta saturada y sometida al paso de tráfico. Los resultados de este estudio indican que el ensayo Simple performance test (SPT) y Superpave indirect tensile test (IDT) con las distintas condiciones de acondicionamiento son eficaces para medir en el laboratorio los daños provocados por el agua.

Mallick et al (2011) también acondicionaron las probetas de ensayo mediante múltiples ciclos de congelación-descongelación (FT) así como ciclos de presión con MIST, pero incluyen un dispositivo de carga acelerada denominado MMLS3 en el que las probetas se encuentran sumergidas en un baño de agua a 60°C.

La mayor parte de los métodos utilizados para determinar la sensibilidad al agua de la mezcla bituminosa son ensayos que utilizan la comparación entre las muestras sometidas a agua y sin ella, mediante ensayos mecánicos o pruebas visuales. Kringos et al (2008) se alejan de estos métodos, y desarrollan un programa de ordenador denominado RoAM que es un subsistema del programa de elementos finitos CAPA-3D. Para su formulación se tienen en cuenta los daños físicos y mecánicos en el firme, por lo que los autores consideran que esto haría posible predicciones más realistas y permitiría evaluar distintos fallos que se producen en el firme bajo condiciones de carga y ambientales.

La falta de un método de ensayo de laboratorio unificado para estimar los daños que se producen en la mezcla bituminosa como consecuencia del agua junto con la falta de correlación entre los métodos utilizados y lo que ocurre in situ, ha provocado el uso de estudios más teóricos, como es el caso de la medida de las Energías Libres Superficial del ligante y el árido (Cheng et al., 2002; Caro et al., 2008; Howson et al., 2007). La energía libre superficial se utiliza para cuantificar la calidad del enlace adhesivo del sistema ligante-árido y la energía de enlace cohesivo del ligante. Los resultados de esta medida proporcionan información acerca de la capacidad del ligante para resistir el agua, las combinaciones de

áridos adecuadas para resistir los daños por el agua y servir así, como un control previo en la selección de materiales.

La Energía Superficial Libre del árido se puede cuantificar usando un dispositivo denominado Universal Sorption Device (USD) y la proporcionada por el ligante mediante el método de Wilhelmy Plate (WP) (Jahromi et al., 2009; Little et al., 2003). Los resultados de estas pruebas se utilizan para aproximar la energía de la unión adhesiva entre el ligante y el árido con y sin presencia de agua.

2.4.8. Métodos de ensayo para determinar el efecto del agua en España: NLT-162 y UNE-EN 12697-12

El método de ensayo que se ha empleado en España para determinar la susceptibilidad de las mezclas al agua en el laboratorio, hasta la entrada del Mercado CE, es el denominado “Efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas bituminosas. compactadas (Ensayo de inmersión-comprensión). NLT-162” (CEDEX, 2000b). Con la entrada de la nueva normativa el ensayo que se utiliza para el mismo fin es el de “Sensibilidad al agua. UNE-EN 12697-12” (AENOR, 2009).

Este apartado se centra en los ensayos de aplicación en España para evaluar el comportamiento de las mezclas bituminosas frente a la acción del agua. Se comienza con el estudio del ensayo bajo normativa NLT, para continuar con el ensayo bajo normativa UNE-EN y se finaliza con el estudio comparativo entre ambos métodos de ensayo.

▪ 2.4.8.1. Efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas bituminosas. compactadas. (Ensayo de inmersión-comprensión). NLT-162.

En esta norma se 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.

Para ello se fabrican diez probetas cilíndricas según se describe en la norma NLT-161 “Resistencia a compresión simple de mezclas bituminosas” (CEDEX, 1998).

Las diez probetas se dividen en dos grupos de cinco con densidad medias aproximadamente iguales y a continuación se acondicionan.

Se indican dos procedimientos de acondicionamiento de los cuales se elegirá uno:

Procedimiento 1: INMERSIÓN A 49°C

Grupo 1. Se toman cinco probetas y se colocan en un baño de aire o estufa a $(25\pm 1)^{\circ}\text{C}$ durante cuatro días. Finalizado este periodo se introducen en un baño de agua a

(25 ± 1)°C durante dos horas. Se determina a continuación su resistencia a compresión de acuerdo con la norma NLT-161 (CEDEX, 1998).

Grupo 2. Se colocan las restantes cinco probetas en un baño de agua a (49 ± 1)°C durante cuatro días. A continuación se sacan del baño y se mantienen dos horas a temperatura ambiente. Seguidamente se introducen en un baño de agua a (25 ± 1)°C durante dos horas. Se determina su resistencia a compresión de acuerdo con la norma NLT-161 (CEDEX, 1998).

Procedimiento 2: INMERSIÓN A 60°C

Grupo 1. Se toman cinco probetas y se colocan en un baño de aire o estufa a (25 ± 1)°C y se mantienen durante 24 horas. Finalizado este periodo se introducen en un baño de agua a (25 ± 1) °C durante dos horas. Se determina a continuación su resistencia a compresión de acuerdo con la norma NLT-161 (CEDEX, 1998).

Grupo 2. Las otras cinco probetas se sumergen en un baño de agua a (60 ± 1)°C durante 24 horas. A continuación se sacan del baño y se mantienen dos horas a temperatura ambiente. Seguidamente se introducen en un baño de agua a (25 ± 1)°C durante dos horas. Se determina su resistencia a compresión de acuerdo con la norma NLT-161 (CEDEX, 1998).

En este ensayo se obtiene un índice numérico de la pérdida producida al comparar la resistencia a compresión simple obtenida entre probetas mantenidas al aire y probetas duplicadas sometidas a la acción del agua.

▪ **2.4.8.2. Sensibilidad al agua. UNE-EN 12697-12.**

En esta norma europea se describen tres métodos para determinar el efecto de saturación y acondicionamiento acelerado de agua.

Método A. Emplea la resistencia a la tracción indirecta de probetas cilíndricas de mezcla bituminosa.

Método B. Emplea la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de mezcla bituminosa.

Método C. Define el valor de adherencia de mezcla bituminosa tipo SA, una hora después del proceso de mezclado, donde la unión entre el betún y árido puede identificarse como el valor de adherencia.

Según la Orden Circular 24/2008 (Ministerio de Fomento, 2008) sobre el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3), la adhesividad

árido-ligante se comprueba mediante el ensayo de tracción indirecta tras inmersión realizado a 15°C según la norma UNE-EN 12697-12 (AENOR, 2009).

Para ello se fabrican seis probetas cilíndricas que se dividen en dos grupos de tres y se acondicionan. Un grupo se mantiene seco a temperatura ambiente, mientras que el otro grupo se satura y se sumerge en agua a una temperatura de 40°C durante un periodo de 68-72 horas.

Tras el acondicionamiento, la fuerza de tracción indirecta de cada uno de los grupos se determina de acuerdo con la norma EN 12697-23 (AENOR, 2004b) a la temperatura de 15°C.

Se determina la relación de la resistencia a tracción indirecta del grupo condicionado en agua, comparando con el del grupo seco, y se expresa en porcentaje.

▪ **2.4.8.3. Ensayo NLT-162 frente UNE-EN 12697-12**

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo de ambos ensayos es determinar la pérdida de cohesión que se produce por la acción del agua sobre las mezclas bituminosas compactadas.

Aunque el objetivo de ambos ensayos coincide, ambos métodos presentan diferencias:

NÚMERO DE PROBETAS ENSAYADAS

Con la antigua norma española NLT-162 (CEDEX, 2000b) se necesitaban diez probetas para realizar el ensayo, con la norma europea UNE-EN 12697-12 (AENOR, 2009), se deben preparar seis probetas.

DIMENSIONES DE LAS PROBETAS

De acuerdo con la norma NLT-162 (CEDEX, 2000b), se prepararan probetas cilíndricas de 101,6 mm de diámetro por 101,6mm de altura. En la norma europea el diámetro de las probetas varía dependiendo del tamaño máximo del árido: (80±2) mm el tamaño superior del árido no debe exceder de 11 mm; (100±3) mm el tamaño superior del árido no debe exceder de 22 mm; (120±3) mm; (150±3) mm;(160±3) mm.

COMPACTACIÓN DE LAS PROBETAS

De acuerdo con el ensayo de resistencia a compresión simple de mezclas bituminosas NLT-162 (CEDEX, 2000b), la compactación de las probetas se llevará a cabo mediante la aplicación de una carga creciente hasta alcanzar, en un tiempo determinado, una presión máxima la cuál se mantiene durante dos minutos, figura 3.

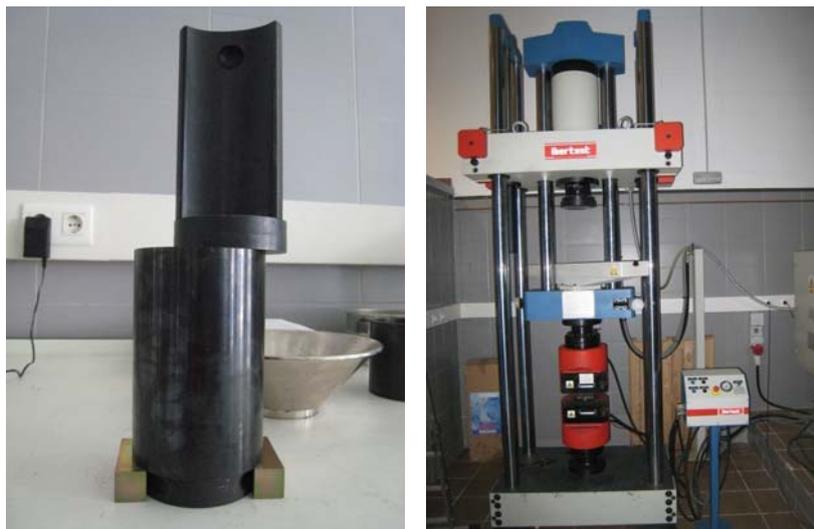


Figura 3. Molde de compactación y prensa.

En la norma europea las probetas se compactarán mediante:

- *Compactador de impactos*, UNE-EN 12697-30 (AENOR, 2007d), para tamaño máximo de árido que no supere 22 mm. Se aplican 50 golpes por cara, figura 4A.
- *Compactador vibratorio*, UNE-EN 12697-32 (AENOR, 2007e) para tamaño máximo de árido mayor de 22mm. Se aplican 80 segundos por cara, figura 4B.
- *Compactador giratorio*, UNE-EN 12697-31 (AENOR, 2008e), figura 4C.
- Testigos extraídos de una placa o capa bituminosa, UNE-EN 12697-33 (AENOR, 2007f).



Figura 4. A. Compactador de impactos

B. Compactador vibratorio

C. Compactador giratorio

ACONDICIONAMIENTO DE LAS PROBETAS

En ambos métodos de ensayo las probetas se dividen en dos grupos: probetas secas y probetas húmedas.

Sin embargo, el conjunto de probetas húmedas del ensayo de sensibilidad al agua, UNE-EN 12697-12 (AENOR, 2009), se satura en un sistema de vacío, figura 5, antes de colocarlas en un baño de agua a $(40\pm 1)^\circ\text{C}$ durante un periodo de 68 a 72 horas.



Figura 5. Sistema de vacío

Mientras que en el ensayo de inmersión-compresión, NLT-162 (CEDEX, 2000b), no se contempla esta saturación y las probetas húmedas se sumergen en agua a 49°C durante cuatro días o a 60°C durante un día.

TEMPERATURA DE ENSAYO

En el antiguo método NLT-162 (CEDEX, 2000b), la temperatura era de $(25\pm 1)^\circ\text{C}$, en cambio en la norma UNE-EN 12697-12 (AENOR, 2009) es de 15°C según el anejo D.3. de la norma EN-13108-20 (AENOR, 2007g).

ROTURA DE LAS PROBETAS

La rotura de las probetas, en el ensayo Inmersión-compresión, NLT-162 (CEDEX, 2000b) es a compresión simple, figura 6A, en cambio en el ensayo europeo, la rotura se realiza a tracción indirecta, figura 6B.

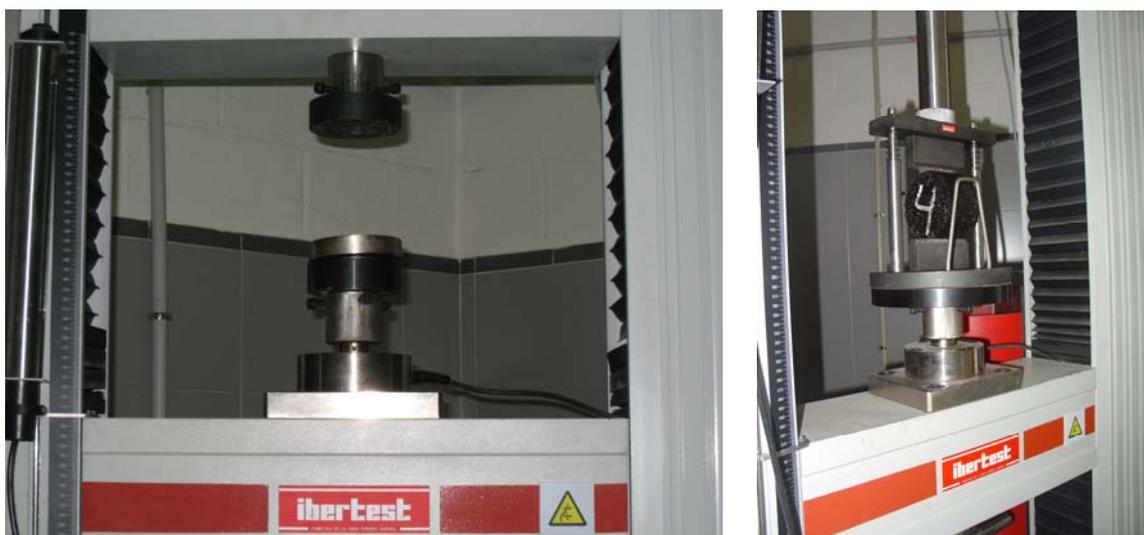


Figura 6. A. Compresión simple

B. Tracción indirecta

EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados de ambos ensayos se expresan en porcentaje. En el ensayo de sensibilidad al agua se calcula la relación de la resistencia a la tracción indirecta, ITSR (Indirect Tensile Strength Ratio), de las probetas del grupo húmedo y las probetas del grupo seco. Dicho parámetro es equivalente al índice de resistencia conservada que se obtiene mediante el ensayo de inmersión-compresión.

En la tabla 3 se recogen las principales diferencias entre ambos métodos de ensayo:

	Sensibilidad al agua UNE-EN 12697-12	Inmersión-Compresión NLT-162
Nº	3+3	5+5
Dimensiones	100-160 mm Ø	101,6 mm Ø
Compactación	- Impacto - Vibración	Compresión
Saturación	Saturación previa en vacío antes de inmersión en agua	No contempla
Condiciones	40°C durante 68-72 horas	- 4 días a 49°C - 1 día a 60°C
Temperatura	15°C	25°C
Rotura	Tracción indirecta	Compresión simple
Expresión	ITSR. Probetas húmedas entre secas	Resistencia conservada. Probetas húmedas entre secas

Tabla 3. Diferencias entre UNE-EN 12697-12 y NLT-162

2.4.9. Consideraciones finales.

Existen distintos métodos de ensayo para evaluar la susceptibilidad al agua de las Mezclas Bituminosas en Caliente.

Estos métodos de ensayo van desde simples observaciones de muestras acondicionadas a métodos más elaborados de fabricación, acondicionamiento y análisis de resultados.

Entre los métodos de ensayo que se utilizan, ensayos sobre mezclas bituminosas sin compactar y compactadas, los más aplicados son los que se llevan a cabo sobre mezclas bituminosas compactadas.

En la práctica actual, en la mayoría de los países, entre ellos España, los ensayos más utilizados son los que emplean la relación entre la fuerza a tracción indirecta (TSR) en distintas versiones, principalmente debido a su simplicidad. El criterio utilizado para aceptar que la mezcla bituminosa es apta para su uso, es el valor dado por la relación a tracción indirecta de probetas acondicionadas y sin acondicionar. El resultado obtenido se compara con un valor prescrito, de manera que si el resultado del ensayo es inferior al valor prescrito, la mezcla se clasifica como susceptible al agua. Dependiendo del tipo de mezcla bituminosa y la capa del firme en la que se encuentre, este valor variará.

En España, este valor se ha visto modificado con el cambio en el método de ensayo de obligado cumplimiento con la entrada en vigor del Mercado CE. Tras la implantación, se detecta que algunas de las mezclas que con la normativa NLT resultaban aptas para su puesta en obra, con los ensayos UNE-EN no cumplen las especificaciones técnica exigidas. Es por ello, por lo que es importante conocer este valor, justificando la realización de este trabajo de investigación.

Los ensayos que tienen en cuenta el efecto del paso del tráfico en los daños producidos por el agua, como el dispositivo HWTD, están siendo cada vez más utilizados ya que incluye la carga dinámica en el procedimiento de acondicionamiento y simula mejor las condiciones reales que se producen en el firme.

2.5. DEFORMACIONES PLÁSTICAS PERMANENTES EN MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE

Este apartado tiene como objetivo el estudio de las deformaciones plásticas en las mezclas bituminosas. En primer lugar se define el significado de deformación plástica, seguidamente se detallan los factores que influyen en este tipo de deterioro, para finalizar con un estudio de los distintos métodos de ensayo que se utilizan para su evaluación, centrándose en los más utilizados en España

2.5.1. Definición

Las deformaciones plásticas permanentes, también conocidas como roderas, es uno de los deterioros principales en las capas superiores del firme que más preocupa dentro del estudio del comportamiento de las mezclas bituminosas en caliente.

Se producen por la acumulación de deformaciones plásticas debidas a la aplicación de cargas mecánicas del tráfico, especialmente vehículos pesados a baja velocidad y altas temperaturas, debido al comportamiento viscoelastoplástico de las mezclas bituminosas (Suo et al., 2009; Doh et al., 2007). Se llama deformación permanente porque representa la acumulación de pequeñas deformaciones producidas por cada aplicación de carga que son irreversibles. Como consecuencia se forman depresiones en el pavimento a lo largo de la trayectoria longitudinal de circulación de los vehículos, acompañados en general, de pequeños levantamientos a los lados (Fontes et al., 2010). La acumulación de deformaciones plásticas puede ser causada por una reducción volumétrica del material que compone la mezcla bituminosa y por las deformaciones debidas a los esfuerzos de corte que transmiten las cargas del tráfico.

Sus consecuencias son la pérdida de regularidad superficial que repercute de forma negativa en la calidad del servicio prestado a los usuarios así como las pérdidas económicas causadas por los costes de mantenimiento.

2.5.2. Mecanismos de formación de roderas

La aparición de roderas en un firme se debe principalmente a dos causas: deformación permanente en las capas subyacentes, y/o deformación permanente en el firme (Garnica et al., 2005, Morea, 2011).

La *deformación permanente en las capas subyacentes* se genera por la aplicación repetida de carga en la capa sub-base o base del firme. Normalmente, esta deformación es el resultado de una sección de firme demasiado delgada, y sin la suficiente profundidad para reducir a niveles tolerables la tensión sobre la subrasante cuando se aplican las cargas. También puede ser debido a una escasa compactación o a la intrusión de agua. Se considera un problema estructural, más que de los materiales empleados aunque se utilicen materiales más rígidos para mitigar el problema.

Por otro lado, la *deformación en el firme* es causada por una mezcla bituminosa cuya resistencia al corte es demasiado baja para soportar las cargas pesadas repetidas a las que está sometida. Se va acumulando pequeñas deformaciones plásticas que son permanentes en cada pulso de carga. La deformación por corte se caracteriza por un movimiento de la mezcla hacia abajo y lateralmente.

El desarrollo de roderas en capas del firme ha sido en general descrito como un proceso de dos etapas. La primera etapa consiste principalmente en la densificación del material acompañado por el cambio de volumen (consolidación), mientras que la segunda etapa consiste principalmente en deformación plástica por esfuerzos de corte (flujo plástico no asociado con el cambio de volumen), que puede ocurrir en cualquier capa del pavimento. En casos extremos la consolidación y deformación por cizallamiento se pueden producir simultáneamente y conducen a una alteración severa de la capa (Verhaeghe et al., 2007).

Inicialmente algunas roderas se producirán en la capa de mezcla bituminosa en caliente como resultado de la densificación continuada producida por el tráfico. Los áridos se mueven y disminuyen los huecos aire de la mezcla. A medida que aumenta la densificación con el tiempo y el tráfico, la estabilización de la mezcla generalmente mejora, lo que se traduce en una disminución en la tasa de deformación, causada por la reordenación de los áridos, la mejora de enclavamiento entre las partículas y el endurecimiento del ligante. La densidad final alcanzada por la mezcla, dependerá de varios factores como el grado de compactación inicial, propiedades de los materiales utilizados, el diseño de la mezcla, condiciones ambientales, el tráfico y el espesor de la capa.

Después de la densificación, la disminución de volumen debajo de las ruedas es aproximadamente igual al aumento de volumen en las zonas laterales de las rodadas, lo que se conoce como deformación plástica por esfuerzos de corte. Es un indicador de que la compactación debida al tránsito ha sido completada casi en su totalidad, y que las deformaciones posteriores son causadas esencialmente por desplazamientos de la mezcla a volumen constante (Garnica et al., 2005). Tiene lugar cuando la resistencia a la deformación combinada proporcionada por la fricción es superada por el esfuerzo cortante aplicado. Se producen deformaciones a volumen constante por flujo de la mezcla. Esto se traducirá en pequeños movimientos de flujo asociados con las cargas de tráfico repetitivas. Se considera que esta última fase es representativa del comportamiento a la deformación permanente del firme para la mayor parte de su vida de servicio.

Son varias las investigaciones que se han llevado a cabo para conocer las contribuciones relativas de cada una de las capas a la deformación permanente total que ocurre en el pavimento (Haddock et al., 2005).

Wang et al. (2009) concluyeron que la capa intermedia es la que más afecta a la formación total de roderas en el firme, seguido de la capa base y la de rodadura. Por lo que recomiendan prestar especial atención en la selección del diseño, del material y de la construcción de la capa intermedia.

Así, Haddock et al. (2005) estudiaron la contribución de las capas a partir de un análisis de su perfil transversal y crearon un método para estimarlo mediante elementos finitos.

2.5.3. Factores que influyen en la formación de roderas

Las propiedades de una mezcla bituminosa dependen de la calidad de los materiales que la componen, el diseño de la mezcla y el proceso de construcción. Son varios los factores que afectan a la resistencia de la mezcla bituminosa a la formación de roderas. Con el objeto de producir mezclas bituminosas con resistencia a estas deformaciones, es necesario conocer las propiedades de los componentes que influyen. Podemos distinguir entre los factores internos y factores externos. En este apartado se detallarán cada uno de ellos.

▪ 2.5.3.1. Factores internos

A continuación se describen los factores internos que influyen en la formación de roderas. Estos están directamente relacionados con las propiedades de los materiales que forman la mezcla bituminosa.

GRANULOMETRÍA DE LOS ÁRIDOS

La granulometría hace referencia a la distribución de los distintos tamaños de áridos que forman la mezcla.

Se cree que las mezclas con granulometrías densas o granulometría continua mitigan los efectos de las roderas. Cuando éstas se compactan, se logran menos contenidos de huecos y mayores puntos de contacto entre los áridos que las mezclas con granulometría abierta (Padilla, 2004).

Steyn et al. (2008) analizaron en su estudio el efecto de la granulometría de los áridos. Para ello fabricaron dos tipos de mezclas bituminosas en caliente, una de ellas con mayor cantidad de árido grueso que la otra. Mediante un simulador de vehículos pesados (Heavy Vehicle Simulator (HVS)) confirmaron que las mezclas con mayor contenido de gruesos son más resistentes a la formación de roderas que las que tienen mayor cantidad de finos, incluso a mayores temperaturas.

Reyes et al. (2008) concluyeron que dentro de una mezcla bituminosa densa, las curvas granulométricas inferior, media e superior, están directamente relacionadas con la deformación permanente.

En el diseño de mezclas bituminosas en caliente mediante Superpave, se utiliza la línea de máxima densidad. Dentro de ella se ha introducido una zona de restricción superpuesta, a través de la cual no es recomendable que pase la granulometría de los áridos que forman la mezcla. Se considera que las granulometrías que pasan a través de esta zona pueden tener una baja estabilidad o resistencia a la rodadura (Abo-Qudais et al., 2007). Las granulometrías que pasan por encima de la zona restringida se denominan mezclas con granulometría fina y las que pasan por debajo, mezclas con granulometría gruesa. Algunos estados de EEUU especificaban el diseño de mezclas por debajo de la zona restringida y otros por encima. Son

varios los estudios que se han llevado a cabo para comprobar la formación de roderas en las mezclas que pasan por encima, a través y por debajo de la zona restringida. Kandhal et al. (2001a), Kim et al. (2009) comprobaron mediante el analizador de pavimento asfáltico (APA), que las mezclas que pasan por la zona de restricción no tienen mayor profundidad de rodera que aquellas que cumplen con la zona de restricción.

Kandhal et al. (2002b) realizaron un estudio comparando mezclas con granulometría gruesa con mezclas con granulometría fina. Para ello se ensayaron distintas mezclas con dos tamaños de árido máximo nominal, dos tipos de áridos grueso, y cuatro tipos de áridos finos. La resistencia a la formación de roderas se llevo a cabo con dispositivo Superpave shear tester (SST). El análisis estadístico indica que no existe una diferencia significativa en la resistencia a la rodadura de mezclas con granulometría gruesa y fina.

Choubane et al. (2006) demostraron que bajo condiciones controladas, las mezclas con granulometría fina presentan mejor rendimiento en términos de resistencia a la formación de roderas.

El-Basyouny et al. (1999) también evaluaron el efecto de la granulometría del árido en mezclas diseñadas mediante Superpave. Prepararon distintas mezclas y realizaron ensayos de fluencia. Llegaron a la conclusión que mezclas preparadas con una granulometría de áridos que pasa por debajo de la zona restringida, tenían mejor resistencia a la formación de roderas que las que pasan por encima o a través de ella.

Actualmente, debido a los resultados obtenidos de distintos estudios, en el caso de mezclas diseñadas mediante Superpave, se ha eliminado la zona restringida por la que no era recomendable que pasara la granulometría de los áridos Cooley et al (2002).

Los investigadores han llegado a distintas conclusiones con respecto a los efectos que tienen la granulometría de los áridos en la resistencia de la mezcla a las deformaciones plásticas permanentes, a veces contradictorias. Sin embargo, parecen estar de acuerdo en que la granulometría de los áridos tiene una influencia sobre la resistencia a este tipo de deformaciones.

FORMA Y TEXTURA DEL ÁRIDO

Tanto la forma como la textura son propiedades que tienen que ver con el origen del árido (Thenoux et al., 2002).

La forma de los áridos y la textura de su superficie afectan a la unión con el ligante y a la resistencia al deslizamiento de una árido sobre otro (Gabbar, 2002). Mezclas con áridos triturados, tienen forma angular y textura rugosa, y son menos deformables que aquellas que se han elaborado con áridos redondeados, aún con la misma granulometría (Garnica et al., 2005). Áridos, tanto áridos gruesos como finos, con textura rugosa y forma angular

tienen mayor contacto entre las partículas que los áridos con superficie lisa y redondeada (Topal et al., 2005).

Áridos redondeados proporcionan una ubicación mínima entre las partículas, los áridos “rodarán” unos sobre otros permitiendo que durante la aplicación de carga, la mezcla bituminosa fluya al no existir suficiente fricción interna. Aumentado las caras de fractura en el árido grueso, para aumentar su angularidad, se mejora la estabilidad de la mezcla bituminosa y muestra mayor resistencia al corte (Bennert et al., 2011).

La cuantificación de las irregularidades geométricas de los áridos es esencial para la comprensión de sus efectos sobre el rendimiento del firme y para la selección de los áridos adecuados para producir firmes de buena calidad. Así Topal et al. (2008), cuantificaron la angularidad del árido fino mediante tres ensayos distintos: ASTM C1252 (Uncompacted Void Content of fine aggregate); EN 933-6 y CAR (Compacted aggregate resistance). Basándose en los resultados de estos ensayos, se fabricaron 4 mezclas distintas con el mismo tipo de árido grueso pero diferente árido fino con diferentes valores de angularidad. Estas mezclas se ensayaron mediante el dispositivo LCPC Wheel tracking para determinar sus propiedades respecto a la formación de roderas. Los resultados indicaron que existe una relación entre la rodadura y el ensayo CAR.

Valores altos de angularidad en el árido fino aumenta la resistencia a la deformación permanente de las mezclas bituminosas en caliente (Topal et al., 2005)

Huang, B. et al. (2009) llevaron a cabo un estudio para evaluar la contribución de la estructura del árido en una mezcla bituminosa en caliente tipo denso. Utilizaron como árido grueso grava, con cinco niveles distintos de angularidad y tres tipos de ligante. Para determinar la resistencia a la rodadura utilizaron el Analizador de pavimentos de asfalto (APA) y Creep test. Comprobaron que la profundidad de la rodera y la deformación permanente, decrece con el incremento en la angularidad del árido grueso.

Kim et al. (1992) estudiaron el efecto de la angularidad del árido y la granulometría en la deformación permanente de mezcla bituminosa en caliente. Se concluyó que la angularidad tiene un efecto significativo en la resistencia a la deformación permanente. Mezclas con áridos angulares y superficie rugosa presentan un mejor comportamiento ante las deformaciones permanentes.

El porcentaje de partículas planas y alargadas es otro parámetro a tener en cuenta. Este tipo de partículas se rompen durante la construcción, cambiando la granulometría y por tanto las propiedades de la mezcla bituminosa. Las partículas planas tienden a colocarse en la mezcla sobre su cara plana, creando planos preferenciales de deslizamiento y reduciendo la unión entre los áridos (Morea, 2011).

Chen et al. (2005) utilizarón el ensayo Wheel-tracking para estimar directamente la respuesta de la estructura interna de una mezcla bituminosa en caliente en términos de

profundidad de la rodera. Se comprobó que la profundidad de la rodera disminuye significativamente cuando el porcentaje de partículas planas y alargadas, disminuye de 60 a 0%. Un alto porcentaje de partículas planas y alargadas podría conducir a una estructura interna débil que disminuye la capacidad de soportar la carga del tráfico.

POLVO MINERAL (FILLER)

El polvo mineral o filler forma parte del esqueleto mineral de la mezcla bituminosa, por lo tanto, soporta tensiones por rozamiento interno o por contacto entre las partículas. Además rellena los huecos entre el árido fino y el grueso, proporciona puntos de contacto entre los áridos gruesos y los encaja limitando sus movimientos, aumentando su estabilidad. También hace la mezcla más trabajable al envolver los áridos gruesos y evitar su segregación y facilita la compactación (Padilla, 2004).

Las características del polvo mineral y su impacto en la deformación permanente de las mezclas bituminosas en caliente, varían con la granulometría y forma, así como la cantidad que se añade a la mezcla.

Si el filler contiene una alta cantidad de partículas muy finas (partículas inferiores a 10 micras), éstas podrían actuar como fluidificantes del ligante. Los huecos se llenarían de un exceso de ligante dando lugar a mezclas inestables (Verhaeghe et al., 2007). Una cantidad elevada de filler pondrá en peligro la resistencia a la formación de roderas en la mezcla, así como en la fatiga. Esto puede ser debido a la alta superficie específica que presenta que reducen el espesor de la capa de ligante. Una alta relación filler/betún es perjudicial, aumenta la viscosidad del mástico y la mezcla se vuelve más rígida (Banerjee et al., 2012).

Una cantidad adecuada de filler aumentará la fuerza de cohesión y rigidez del mástico (polvo mineral junto con ligante), proporcionando una resistencia adicional a la deformación permanente.

Por esta razón, tanto las proporciones como la procedencia, se limitan según el tipo de mezcla.

LIGANTE

El ligante bituminoso es otro de los componentes de las mezclas bituminosas en caliente. A bajas temperaturas el ligante tiene el comportamiento de un sólido elástico mientras que a altas temperaturas se comporta como un fluido viscoso (Gabbar, 2002; Morea, 2011). En medio de estos dos estados se comporta como un material viscoelástico, cuya resistencia a la deformación bajo carga es muy sensible al tiempo de carga y a la temperatura.

La selección del grado del ligante debe hacerse en base al clima, así como al nivel de tráfico y las velocidades de circulación (Thenoux et al., 2002).

Mezclas bituminosas en caliente con betunes duros son más resistentes a la formación de roderas que las misma mezcla bituminosas con betunes más blandos (Lu et al., 2007).

El rendimiento de las mezclas bituminosas en caliente ante la deformación permanente depende de las propiedades reológicas del ligante (modificados o no modificados) (Morea et al., 2011). La viscosidad bajo cizallamiento (LSV) caracteriza la resistencia de la mezcla bituminosa en la deformación permanente. A altas temperaturas en el firme, el ligante convencional se comporta como un fluido newtoniano cuando las tensiones de cizallamiento son pequeñas, siendo su viscosidad independiente a la tasa de cizallamiento. Al contrario, los ligantes modificados se comportan como un líquido pseudoplástico que depende fuertemente de la velocidad de cizallamiento, a velocidades de cizalla muy bajas el comportamiento es similar a un fluido newtoniano. En este caso, la energía se disipa hasta que la resistencia al flujo alcanza un valor constante. En este punto la viscosidad se vuelve independiente de las tasas de cizallamiento, es denominado viscosidad cero de cizalladura (VSZ).

Morea et al. (2011) prepararon distintas mezclas bituminosas con los mismos áridos y granulometría pero con distintos ligantes (convencional, multigrado y modificado con polímeros). Evaluaron la resistencia a la formación de roderas mediante el ensayo en pista a distintas temperaturas y en paralelo midieron la viscosidad bajo cizallamiento (LSV). Comprobaron que la velocidad de deformación depende del tipo de ligante empleado y ésta a la vez es mayor cuando la temperatura aumenta. Son más susceptibles a sufrir roderas las mezclas preparadas con un ligante convencional que las mezclas bituminosas que utilizan ligantes multigrado o ligantes modificados con polímeros. A su vez, las mezclas bituminosas preparadas con ligantes modificados con polímeros son las que presentan mejores resultados.

Los polímeros son los aditivos más utilizados en la modificación del ligante. Hay distintos tipos de polímeros cuyo objetivo es la mejora de las propiedades del ligante. Para lograrlo éste deber crear una red secundaria o un nuevo sistema de equilibrio dentro del ligante (Özen, 2011). Entre los polímeros más utilizados se encuentra el elástomero estireno – butadieno-estireno (SBS). Éste copolímero puede mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas como la deformación permanente.

Özen (2011) evalúa la deformación permanente en mezclas preparadas con ligante convencional, ligante modificado con SBS y otras preparadas con éste tipo de ligante y adicionando a la mezcla cal hidratada. Como ensayos de laboratorio utiliza el ensayo en pista del Laboratorio Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Las mezclas con betún convencional muestran mayor deformación permanente que las preparadas con el ligante modificado con SBS. Este tipo de ligante a su vez aumenta la resistencia a la deformación permanente de las mezclas bituminosas a las que se les añadió cal hidratada.

Tayfur et al. (2007) llevaron a cabo una investigación sobre las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas modificadas con distintos aditivos. Una de las propiedades que estudiaron es la deformación permanente. Los aditivos utilizados fueron polialfaolefina, fibra de celulosa, poliolefina, fibra de celulosa mezclada con el betún y SBS. Los ensayos empleados son: resistencia a tracción indirecta, ensayos de fluencia y ensayo en pista LCPC. La mezcla bituminosa con ligante modificado con SBS muestra la mayor resistencia a la deformación permanente. Se cree que los modificadores contribuyen a la adherencia entre los áridos en las mezclas bituminosas en caliente. El tipo de modificador de ligante afecta significativamente al rendimiento ante la deformación permanente.

Las mezclas bituminosas fabricadas con ligantes modificados presentan menos profundidad de rodera que las mismas mezclas en las que se utiliza un ligante sin modificar (Rebollo et al., 2010; Fonseca, 2000).

Los ligantes modificados con caucho presentan mejor resistencia a la formación de roderas. Fontes et al. (2010) introdujeron caucho por vía húmeda en el ligante con objeto de comparar el comportamiento frente a la deformación permanente de mezclas fabricadas con ligante modificado con caucho frente a mezclas con ligante convencional. Para ello se utilizaron como ensayos el Analizador de Pavimentos Asfálticos (APA) y Repeated Simple Shear Test at Constant Height (RSST-CH). Los resultados de los ensayos mostraron que las mezclas bituminosas con ligante modificado con caucho mejoran su resistencia a la deformación permanente en comparación con las mezclas que utilizan un ligante convencional.

El contenido de ligante en la mezcla bituminosa en caliente afecta a la capacidad de la mezcla a resistir las deformaciones plásticas.

En general, se considera que los mayores contenidos de ligante conducen a mayores deformaciones permanentes, debido a que provoca una pérdida en la fricción interna entre las partículas de árido. Por el contrario, un déficit en el contenido de ligante hace que la mezcla bituminosa sea menos duradera y propensa a que se produzca agrietamientos. Desviaciones en los equipos de dosificación de ligantes o reducciones intencionadas por consideraciones económicas, dentro de los límites tolerables de las especificaciones, podría potenciar mezclas bituminosas con unas características no deseables. Así Banerjee et al. (2012) determinaron, entre otros, los efectos del contenido de ligante en la resistencia a la deformación permanente en distintas mezclas bituminosas con un mismo tipo de ligante y cuatro tipos de áridos, pero distintas curvas granulométricas y porcentajes de ligante. Para ello utilizaron el dispositivo Hamburg Wheel-tracking. Se encontró que variaciones en el contenido de ligante en torno a un 1% de su valor óptimo, afectan significativamente a la deformación permanente, aumentando la deformación máxima después de 20.000 pasadas.

Hu et al. (2011) a través de ensayos de laboratorio y análisis estadísticos, identificaron los factores más significativos que afectan a la formación de roderas y desarrollaron un modelo

para predecir la profundidad de la rodera. El propósito de desarrollar este modelo es determinar el contenido de ligante máximo permitido en una mezcla bituminosa, que se puede utilizar sin producir deformaciones plásticas permanentes. Éstos fueron verificados previamente por los datos obtenidos en National Center for Asphalt Technology y las secciones de ensayo de WesTrack.

Tayfur et al. (2007) obtuvieron un contenido óptimo de ligante mayor en las mezclas bituminosas preparadas con ligantes modificados que la mismas mezcla pero utilizando un ligante convencional. El ensayo en pista del Laboratorio Central des Ponts et Chaussées (LCPC) mostró que las mezclas con ligantes modificados se comportan mejor que la mezcla con ligante convencional a pesar de ser mayor el contenido óptimo de ligante.

CONTENIDO DE HUECOS EN LA MEZCLA BITUMINOSA

El porcentaje de huecos en una mezcla bituminosa en caliente, es uno de los factores que afectan de manera más significativa al rendimiento del firme.

El contenido de huecos en una mezcla bituminosa depende del contenido de ligante, la compactación de la mezcla durante su construcción y de la compactación final producida por el tráfico.

Se puede diferenciar entre distintos huecos dentro de una mezcla bituminosa compactada (AENOR, 2003a):

Se denominan *huecos aire* a la bolsa de aire entre las partículas de áridos recubiertas de ligante, el porcentaje que ocupan estos huecos respecto al volumen total de la probeta se conoce como contenido en huecos aire (V_m).

Los *huecos en el árido mineral* (VMA) hacen referencia al volumen del espacio intergranular entre las partículas del árido de una mezcla bituminosa compactada, que incluye los huecos aire y el volumen del ligante bituminoso de la probeta, expresado como un porcentaje del volumen total de la probeta.

Los *huecos rellenos con ligante* (VFB) son el porcentaje de huecos rellenos con ligante que existen en el árido mineral.

Un contenido de huecos aire alto dan como resultado un exceso de rodera ya que permiten más densificación bajo el tráfico y también se pueden producir daños por humedad. Por otro lado, cuando el porcentaje de huecos aire es muy bajo la mezcla bituminosa puede manifestar deformaciones plásticas con la aplicación de pequeñas cargas (Williams et al., 2005).

Suo et al. (2009) estudiaron el comportamiento frente a la formación de roderas, de la mezcla bituminosa con distintos contenidos de huecos aire (1,5%, 2,5%, 4,5%, 8%, 10% y 12%). Mediante elementos finitos evaluaron la progresión de la deformación permanente en las mezclas bituminosas. Para verificar los resultados obtenidos, utilizaron el ensayo Wheel

tracking para obtener datos de laboratorio. Los resultados indicaron que el contenido en huecos aire tiene una influencia significativa en el comportamiento de la rodadura bajo las cargas de la rueda. Para contenidos de huecos en el intervalo de 4,5-8%, la profundidad de la rodera cambia muy poco con la tensión aplicada. Para porcentajes de huecos aire superior a los anteriores, se reduce la resistencia a la formación de roderas y se observa mayor profundidad. Esto puede ser debido a que los huecos aire bajos y altos en la mezcla puedan ser causados por una compactación excesiva y pobre, respectivamente.

Xu et al. (2012) analizaron los cambios en el porcentaje de huecos aire en las tres capas de una carretera que llevaba abierta al tráfico 7 años. Los resultados se compararon con otras carreteras para identificar las diferencias que podrían explicar las roderas.

Para ello midieron la profundidad de la rodera en el firme y extrajeron testigos. A los testigos extraídos se les calculó el porcentaje de huecos aire. Se observó que algunos porcentajes de huecos aire en las tres capas estaban por debajo del 3%. El descenso excesivo del porcentaje de huecos está relacionado con la deformación ocurrida en el firme. Basado en los resultados obtenidos concluyeron que una compactación inadecuada durante la construcción es responsable, en gran parte, de la profundidad de la rodera. Hay una disminución significativa de los huecos aire para las tres capas debido a los efectos combinados de las cargas por eje y las altas temperaturas.

Cuando el contenido de huecos aire es menor de 2-3%, el ligante actúa como un “lubricante” entre los áridos y reduce puntos de contacto entre ellos. La deformación permanente en las mezclas bituminosas está controlada por el componente plástico de la estructura de los áridos. Esto provoca cambios en la deformación permanente, ya sea en volumen o en cizalladura, lo que ocurre sobre todo en días más calurosos o por cargas pesada. Cuando se somete a cargas o temperaturas más bajas, la mezcla bituminosa apenas se deformará. (Fontes et al., 2010; Sousa et al., 1994).

Kandhal et al. (2001a) llevaron a cabo una investigación sobre el efecto que tienen los huecos en el árido mineral (VMA) en la formación de roderas en las mezclas bituminosas. Utilizaron mezclas con distintos tipos de áridos y las ensayaron con el analizador de pavimentos asfálticos (APA). Concluyen que el efecto de este tipo de huecos en la formación de roderas está asociado con el espesor de la capa bituminosa. Un aumento en los VMA y en el espesor de la capa, causan un incremento en las deformaciones permanentes para las mezclas con dos tipos de áridos, mientras que disminuye para las mezclas que contienen áridos de mayor tamaño.

▪ **2.5.3.2. Factores externos**

Algunos de los factores externos que influyen en la formación de deformaciones plásticas son el tráfico y las condiciones ambientales.

TRÁFICO

El tráfico es uno de los principales factores que afecta a la deformación permanente en los firmes. Las características del tráfico que afectan a la formación de roderas son: presión y área de contacto del neumático, carga de los vehículos y su velocidad.

Las cargas de los vehículos, sobre todo los vehículos pesados, como los camiones, aumentan la magnitud de las deformaciones. Si estos, además, circulan a baja velocidad, el ligante pierde rigidez y aumenta la componente plástica e irre recuperable de las deformaciones.

Las cargas de los vehículos se transmiten al firme a través de los neumáticos. El efecto de la presión de inflado de neumáticos juega un importante papel en combinación con la carga por eje en el deterioro de los firmes. Las presiones altas de contacto conllevan formación de roderas

Chatti et al. (1996) utilizaron una sección de carretera como pista de pruebas en PACCAR Center en Mount Vernon, Washington. Ésta fue equipada con extensómetros en la superficie y en los testigos de pavimento y ensayada usando un camión que se mueve a diferentes velocidades y con diferentes presiones en los neumáticos. Los resultados indican que los efectos tanto del vehículo como la velocidad y presión de los neumáticos sobre las tensiones del pavimento son importantes.

CONDICIONES AMBIENTALES

La temperatura y el agua son dos variables que influyen en la deformación permanente de las mezclas bituminosas en caliente.

Un aumento de temperatura conlleva un aumento en la profundidad de las roderas. Esto es debido a que el ligante es susceptible a la temperatura, un aumento de ésta conduce a una disminución de la viscosidad y rigidez del ligante, que implica más movimiento de los áridos y más deformación permanente (Gabet et al., 2011).

El agua genera una pérdida de resistencia y durabilidad de la mezcla bituminosa ya que favorece el desprendimiento del ligante de la superficie de los áridos, esto aumenta la susceptibilidad a sufrir deformaciones plásticas permanentes. Este factor ha sido estudiado con detalle en el epígrafe anterior.

2.5.4. Ensayos de laboratorio para evaluar las deformaciones plásticas permanentes

Hay una gran variedad de ensayos y dispositivos que se utilizan para evaluar el potencial de una mezcla bituminosa en caliente a sufrir deformaciones plásticas permanentes.

Estos ensayos se pueden dividir en 3 grupos: ensayos fundamentales, ensayos empíricos y ensayos de simulación (Zhang et al., 2002).

▪ 2.5.4.1. Ensayos fundamentales

Estos ensayos permiten encontrar ecuaciones constitutivas en función de distintas tensiones y condiciones de servicio. Al contrario de los ensayos de simulación, los resultados de este tipo de ensayos pueden ser utilizados para obtener las características fundamentales, es decir, parámetros del material como elasticidad, viscosidad o plasticidad. Estos parámetros pueden ser facilitados como valores de entrada para los modelos empíricos, semi-empíricos o reológico para predecir el comportamiento de la deformación permanente en el tráfico real y situaciones específicas del clima (Blab et al., 2006.).

Entre estos ensayos se encuentran:

➤ *Ensayo de compresión uniaxial cíclico.* (AENOR, 2006b)

Este método de ensayo determina la resistencia a la deformación permanente de una probeta cilíndrica de mezcla bituminosa bajo la aplicación repetida de una carga. Las probetas se pueden preparar en laboratorio o pueden ser testigos extraídos de un pavimento.

Una probeta cilíndrica de 150 mm de diámetro, mantenida a una temperatura elevada, se coloca entre dos platos de carga planos y paralelos. El plato superior tiene un diámetro de 100 mm. La probeta se somete a una presión axial cíclica de impulso en bloque. No se aplica presión de confinamiento lateral adicional.

Durante el ensayo, se mide el cambio de altura de la probeta para un número determinado de aplicaciones de carga. A partir de estas mediciones, se determina la deformación axial acumulada ϵ_N (deformación permanente) de la probeta, como una función del número de aplicaciones de carga. Los resultados se representan en una curva de fluencia, a partir de la cual, se calculan las características de fluencia de la probeta.

El ensayo no permite una predicción cuantitativa de la formación de roderas. Sin embargo, si permite la clasificación de varias mezclas o comprobar la aceptabilidad de una mezcla dada.

➤ *Ensayo de compresión triaxial cíclico* (AENOR, 2006b).

Una probeta cilíndrica, preparada en laboratorio o extraída de la carretera como un testigo, mantenido a una temperatura de acondicionamiento elevada, se coloca entre dos platos de carga planos y paralelos. La probeta se somete a una presión de confinamiento σ_c a la que se superpone una presión axial cíclica $\sigma_a(t)$. La presión de confinamiento puede ser estática o dinámica.

La presión axial cíclica puede ser:

- Una presión sinusoidal desfasada en el origen $\sigma_a(t)$, con una amplitud σ_v . Se pueden aplicar periodos de reposo.

- Una presión de impulso en bloque $\sigma_a(t)$ de una altura σ_B .

En ambos casos se permite una pequeña carga estática.

Durante el ensayo, se mide el cambio en altura experimentado por la probeta, para números especificados de aplicaciones de carga. Se determina la deformación axial acumulada ϵ_n (deformación permanente) de la probeta en función del número de aplicaciones de carga. Los resultados se representan en una curva de fluencia y a partir de ella, se calculan las características de fluencia de la probeta.

Los resultados del ensayo dependen de las condiciones de esfuerzo aplicados, de la temperatura de ensayo, de la frecuencia, del periodo de reposo y de las dimensiones de las probetas. Los resultados obtenidos con una aplicación de carga sinusoidal desfasada en el origen, no se puede comparar cuantitativamente con los resultados obtenidos con la aplicación de carga de impulsos en bloque, debido a la presencia de periodos de reposo y a la forma diferente de la señal.

El *Strategic Highway Research Program (SHRP)*, estudio durante el desarrollo del proceso de diseño Superpave, una serie de ensayos utilizando el dispositivo Superpave shear tester (SST) para predecir el rendimiento de las mezclas bituminosas en caliente (Chowdhury et al., 2002).

Este dispositivo de ensayo es capaz de utilizar la carga estática y dinámica en condiciones confinadas y no confinadas. Inicialmente, los investigadores SHRP proponen seis diferentes protocolos de ensayo de SST para caracterizar las mezclas bituminosas en caliente. Los seis diferentes ensayos fueron los siguientes:

- Volumetric Test,
- Uniaxial Test,
- Frequency Sweep at Constant Height (FSCH)
- Simple Shear at Constant Height (SSCH)
- Repeated Shear at Constant Height (RSCH)
- Repeated Shear at Constant Stress Ratio (RSCSR)

Después de que comenzará este estudio, se eliminaron las pruebas volumétricas y uniaxial de los protocolos de SST (Chowdhury et al., 2002).

➤ *Simple Shear Test*

Se aplica un ciclo de carga estática. Básicamente son de carga-descarga, bajo una tensión especificada durante un tiempo determinado.

Durante el proceso de carga-descarga, la probeta se somete a deformación plástica y elástica. Se obtiene una gráfica esfuerzo-deformación, sobre la que se determina el

módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson en la parte elástica de la gráfica. En la parte plástica proporciona una constante volumétrica, el ángulo máximo de fricción. Estas propiedades ayudan a predecir la deformación permanente de la mezcla bituminosa en caliente.

➤ *Frequency Sweep Test*

Es un ensayo de tensión controlada que se utiliza para medir el comportamiento viscoelástico de las mezclas bituminosas. Se aplica una carga sinusoidal sobre las probetas a 10 frecuencias distintas y se mide el esfuerzo. La relación entre la respuesta del esfuerzo y la deformación, se utiliza para calcular el ángulo de fase de corte y el módulo complejo de corte. Un ángulo de corte bajo, indica un comportamiento más elástico, que es más resistente a la formación de roderas. Un módulo complejo de corte alto indica una mezcla más rígida que es más resistente a la formación de roderas.

➤ *Repeated Shear Test*

Hay dos tipos, uno a altura constante y otro a esfuerzo constante. El objetivo de desarrollar estos ensayos es comprobar la susceptibilidad de la mezcla bituminosa en caliente a sufrir fluencia terciaria. La fluencia terciaria es una forma severa de formación de roderas, donde un pequeño número de repeticiones de carga pueden causar una gran cantidad de deformaciones plásticas. Se aplica un gran número de cargas y se mide la deformación de corte.

- En el *ensayo de esfuerzo constante*, se aplican pulsos de carga en forma haversiana (tipo especial de pulso de carga $[(1-\cos\theta)/2]$ que se aproxima al efecto que produce la carga de la rueda en el firme). Cada pulso de carga es seguido por un periodo de descanso. La relación de carga axial haversiana y carga de corte se mantienen en una relación constante dentro del intervalo 1,2 a 1,5. Se incluyó en el método Superpave como una prueba de detección para identificar las mezclas que muestran flujo plástico terciario.
- En el *ensayo de altura constante*, una carga de corte en forma haversiana de una magnitud determinada se aplica sobre la probeta, y una carga axial variable se aplica para mantener la altura constante de la misma. Cada pulso de carga es seguido de un periodo de descanso.

En base a los resultados de este estudio (Chowdhury et al., 2002), los investigadores recomendaron que la prueba Frequency Sweep at Constant Height (FSCH) es el mejor protocolo de SST. La prueba de FSCH determina dos propiedades fundamentales de los materiales (módulo complejo de corte y el ángulo de fase de corte), que son útiles en modelos predictivos, tanto para formación de roderas como grietas provocadas por la fatiga de la mezcla.

▪ 2.5.4.2. Ensayos empíricos

Están basados en la experiencia y en la correlación de resultados de laboratorio. La mayoría requieren de otros ensayos de laboratorio adicionales (Padilla, 2004). En ellos se evalúa la estabilidad de la mezcla bituminosa (Miro et al., 2002), mediante la rotura de las probetas fabricadas mediante una sollicitación típica de cada ensayo, y la carga de rotura es lo que se denomina estabilidad.

➤ *Ensayo Marshall*

El objetivo de este ensayo es determinar el contenido de ligante óptimo para una mezcla bituminosa en caliente, proporcionando también información sobre sus propiedades como: densidad y contenido de huecos así como estabilidad y deformación. Se fabrican distintas probetas con distintos contenidos de ligante e igual granulometría de áridos, a las que se le determinará la densidad y el contenido de huecos. Estas probetas se sumergen en agua y se rompen para determinar la estabilidad y deformación.

➤ *Ensayo Hveem*

El propósito de este ensayo es determinar el contenido óptimo de ligante para una mezcla de áridos. Al igual que el Ensayo Marshall, va a proporcionar información sobre las propiedades de la mezcla bituminosa en caliente, como deformación y estabilidad (Asphalt Institute, 2003). Para determinar el contenido de ligante se utiliza el ensayo equivalente centrífugo de queroseno. Se preparan las probetas de ensayo con el contenido de ligante determinado, y otras probetas con porcentajes menores y mayores. Se determina su estabilidad y deformación. Finalizando con el ensayo de hinchamiento para determinar el efecto del agua sobre el cambio de volumen y la permeabilidad de las probetas de ensayo.

▪ 2.5.4.3. Ensayos de simulación

Son ensayos que simulan las condiciones de tráfico y carga. Los resultados permiten establecer una clasificación de las mezclas respecto al comportamiento frente a la deformación permanente. Existen distintos dispositivos y ensayos, entre ellos podemos destacar:

➤ *Georgia Loaded Wheel Tester (GLWT)*

Fue desarrollado a mediados de los años 1980 a través de un estudio de investigación entre el Departamento de Transporte de Georgia y la Georgia Institute of Technology.

El GLWT puede ensayar tanto probetas cilíndricas como probetas rectangulares. Las dimensiones de las probetas son 125 mm de ancho, 300 mm de largo, y 75 mm de altura, en el caso de las rectangulares y 150 mm de diámetro y 75 mm de altura en las probetas

cilíndricas. Ambos tipos de probetas se compactan para obtener un porcentaje de huecos aire entre 4-7%.

El ensayo consiste en aplicar una carga de 445 N a través de una rueda de aluminio, que apoya en una manguera neumática presurizada a 690 KPa, situada sobre la probeta. Se realiza un seguimiento de ida y vuelta bajo la carga aplicada. El ensayo tiene una duración de aproximadamente 8.000 ciclos. Se define un ciclo como el movimiento hacia atrás y hacia delante sobre la probeta.

La temperatura de ensayo oscila entre 35 ° C a 60 ° C.

La profundidad de la rodera se obtiene mediante la determinación de la diferencia en la superficie de la probeta antes y después del ensayo (Cooley et al., 2000; Kandhal et al., 2002a).

➤ *Asphalt Pavement Analyzer (APA)* (Choubane et al., 2000; Kandhal et al., 2002a)

Es una modificación de Georgia Loaded Wheel Tester (GLWT), fue construido por primera vez en 1996 por Pavement Technology. Se usa para evaluar la fatiga, la resistencia a la acción del agua y las roderas.

Las probetas utilizadas pueden ser cilíndricas o rectangulares fabricadas en laboratorio o testigos extraídos in situ. Las probetas cilíndricas serán compactadas para obtener un contenido de huecos aire del 4% o 7% y 7% en las rectangulares.

La carga de la rueda y la presión de la manguera han permanecido básicamente iguales que para el GLWT, 445 N y 690 kPa respectivamente. Las temperaturas de ensayo se encuentran entre 40,6°C y 64°C. La muestra, a diferencia del dispositivo anterior, puede estar sumergida en agua para el ensayo.

Como resultados, en este ensayo se obtiene una gráfica de deformación frente al tiempo y la deformación final de la rodera después de 8.000 ciclos.

➤ *Hamburg Wheel-Tracking Device (HWTD)* (Cooley et al., 2000)

Fue desarrollado en Alemania en los años 70. Se utiliza para medir la susceptibilidad de la mezcla bituminosa a formar roderas y a los daños causados por el agua.

Las probetas utilizadas para el ensayo son rectangulares con unas dimensiones de 260 mm de ancho, 320 mm de largo, y por lo general 40 mm de altura, también se pueden utilizar probetas circulares. Estas probetas se compactan a un porcentaje de huecos aire entorno a 7 ± 1 %. Las probetas se sumergen en agua a una temperatura que oscila entre 25 y 70°C, siendo 50°C la temperatura más empleada para el ensayo.

La carga aplicada a la muestra es de 705 N, utilizando una rueda de acero. La rueda se mueve hacia delante y hacia atrás con una velocidad aproximada de 34 cm/seg, hasta llegar a 20.000 pasadas o cuando la deformación que se produce es de 20 mm.

Los resultados obtenidos se representan en una curva de deformación en función al número de pasadas. A partir de esta curva se determinan: la profundidad de la rodera, pendiente de deformación, punto de inflexión de agotamiento (stripping point) y pendiente de extracción (stripping slope).

La pendiente de deformación es el inverso de la tasa de deformación dentro de la región lineal de la curva de deformación después de la compactación y antes de la extracción (si se produce stripping). La pendiente de extracción es la inversa de la tasa de deformación dentro de la región lineal de la curva de deformación, después de la aparición de stripping. El punto de inflexión de extracción es el número de pasadas de la rueda correspondiente a la intersección de la pendiente de deformación y la pendiente de extracción. Este valor se utiliza para estimar la resistencia relativa de la mezcla bituminosa en caliente a los daños producidos por la humedad.

➤ *LCPC (French) Wheel Tracker* (Miro et al., 2002; Cooley et al., 2000)

El Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) wheel tracker, también conocido como French Rutting Tester (FRT) o French Wheel Tracking Test (FWTT), ha sido utilizado en Francia para determinar la resistencia a las deformaciones plásticas de una mezcla bituminosa en caliente, durante los últimos años. Este ensayo ha sido estandarizado en Europa por la norma EN- 12697-22 (Gabet et al., 2011) Últimamente se está utilizando en EEUU.

Una probeta paralelepípeda está sometida a una carga de 5.000N, mediante una rueda neumática con una presión de 600 KN/m². Las dimensiones interiores del molde de la probeta son de 180 x 500x 100 mm ó 180 x 500x 50 mm, según el espesor de la capa a la que se destina la mezcla que va a ser estudiada. La compactación se puede realizar según diferentes procedimientos. Pueden ensayarse dos probetas simultáneamente.

Las temperatura de ensayo es generalmente 60 ° C para capa de rodadura y 50 ° C para capa base.

Durante el ensayo se mide la profundidad de rodera a distintos ciclos. También se mide la temperatura de la probeta cada vez que se apunta el valor de la deformación. Cada toma de medidas se hace en 15 puntos distribuidos sobre la superficie de la rodada y se calcula la profundidad de la rodera respecto al espesor original de la probeta, en porcentaje. El ensayo acaba cuando se superan los 15 mm.

Gabet et al. (2011) evaluaron la reproducibilidad de este ensayo, French Wheel Tracking Test, en mezclas con ligantes modificados con polímeros, debido a algunos problemas que

se habían producido como el calentamiento excesivo de la muestra consecuencia de la fricción y adherencia del ligante a la rueda. Se propusieron dos procedimientos con el fin de mejorar la reproducibilidad de este ensayo, los denominados anti- sobrecalentamiento y anti-adherente.

En los años 90 se llevo a cabo un estudio entre miembros de FHWA con distintas industrias y agencias de carreteras de Europa para comprobar la eficacia de los dispositivos APA, FPRT y HWTD en la evaluación de la formación de roderas (Williams et al., 1999). Para ello compararon los resultados obtenidos de estos ensayos con la pista de ensayos WesTrack. WesTrack es una pista de ensayos en la que la carga se aplica mediante el uso de camiones sin conductor con remolques triples a una velocidad de 65 km / h. Las muestras a ensayar fueron cogidas de 10 secciones de esta pista de ensayo que se iban a rehabilitar. Los resultados del estudio demostraron que los tres dispositivos de ensayo estudiados, APA, FPRT y HWTD, tenían una buena correlación con la deformación permanente de las secciones WesTrack estudiadas.

➤ *Purdue University Laboratory Wheel Tracking Device (PURWheel) (Cooley et al., 2000)*

Fue desarrollado en la Universidad de Purdue para evaluar la susceptibilidad de las mezclas a sufrir deformaciones plásticas y/o daños producidos por el agua.

La mezcla es compactada para tener un contenido en huecos aire entre 6-8% o extraída in situ. La probeta utilizada para el ensayo tiene unas dimensiones de 29 x 31 cm y espesor variable dependiendo de la mezcla a ensayar.

Se aplica una presión de 620 KPa, a través de una rueda neumática a una velocidad de 33,2 cm/sg.

El ensayo finaliza cuando hayan transcurrido 20.000 ciclos o hasta que la profundidad de la rodera sea de 20 cm.

➤ *Ensayo en pista de laboratorio. (CEDEX, 2000c)*

El ensayo consiste en someter una probeta de la mezcla bituminosa, al paso alternativo de una rueda en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiendo periódicamente la profundidad de la deformación producida.

Este procedimiento es aplicable principalmente a las mezclas bituminosas fabricadas en caliente y destinadas a trabajar en condiciones severas de tráfico y clima, aunque variando las condiciones de ensayo puede ser también de utilidad en otro tipo de mezclas.

➤ *Ensayo de rodadura (AENOR, 2008d)*

Esta norma describe los métodos de ensayo a seguir para determinar la susceptibilidad de los materiales bituminosos a deformarse cuando están sometidos a carga.

Los ensayos son aplicables tanto a probetas preparadas en laboratorio, como probetas extraídas de un pavimento.

La susceptibilidad de los materiales a deformarse se evalúa por la rodera formada por pasadas repetidas, a temperatura constante, de una rueda sometida a carga.

Se pueden utilizar 3 tipos de dispositivos alternativos: dispositivos de tamaño grande, dispositivos de tamaño extragrande y dispositivos de tamaño pequeño. Con los dispositivos de tamaño grande y extragrande, las probetas se acondicionan en aire durante el ensayo. Con los dispositivos de tamaño pequeño, las probetas se acondicionan en aire o en agua.

El grupo de trabajo Working Group 3 “Mechanical Test for Bituminous Materials” de RILEM ATB Technical Comité 206, realizaron un estudio con distintos dispositivos de ensayo de seguimiento con rueda (WTT) para evaluar el comportamiento de tres diferentes capas de mezcla bituminosa ante la formación de roderas (Perraton et al., 2011). Para ello los dispositivos usados fueron el dispositivo de tamaño pequeño y grande recogido en la norma EN 12697-22 (AENOR, 2008d). Las muestras fueron extraídas del pavimento y ensayadas a 50 y 60°C. Siete laboratorios de distintos países llevaron a cabo los ensayos. Los resultados obtenidos por cada laboratorio son similares con ambos dispositivos. La tasa de rodadura en el dispositivo pequeño es más rápida que en el dispositivo grande. Las curvas de estos dos dispositivos son notablemente diferentes.

Los ensayos recogidos en los dos últimos apartados, NLT-173 y UNE-EN 12697-22, se estudiarán con más detalle en el epígrafe siguiente.

2.5.5. Métodos de ensayo para evaluar la deformación plástica en España: NLT-173 y UNE-EN 12697-22

En el laboratorio, la deformación plástica se ha medido, en España, directamente mediante Ensayo en pista de laboratorio NLT-173 (CEDEX, 2000c). Tras la entrada en vigor del Mercado CE, éste ensayo es sustituido por el Ensayo de Rodadura, UNE-EN 12697-22 (AENOR, 2008d). En los siguientes epígrafes se desarrolla cada uno de ellos, se finaliza con un análisis comparativo entre ambos para estudiar las diferencias y/o similitudes que presentan ambos métodos de ensayo.

▪ 2.5.5.1. Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio. NLT-173

Ensayo utilizado en España para determinar la resistencia a la deformación plástica de una mezcla bituminosa, tanto en el caso de probetas preparadas en el laboratorio como en el de testigos procedentes de pavimentos.

Se fabrican tres probetas con una densidad mínima del 97% de la densidad Marshall, en mezclas densas y semidensas, y de 95% de la densidad Marshall, en las restantes mezclas.

Las probetas prismáticas se preparan con un compactador vibratorio, figura 7.



Figura 7. Equipo de compactación NLT 173

Dependiendo del tamaño máximo del árido constitutivo de la mezcla en estudio, se utilizan moldes con distinta altura interior (fondo), según el siguiente criterio:

Tamaño máximo nominal del árido (mm)	Altura mínima interior del molde,H, (mm)
31,5	80
22,4	60
16	40
≤ 8	25

Tabla 4. Criterio de elección de molde según el tamaño máximo del árido

La mezcla se introduce en el molde, se distribuye uniformemente y se enrasa. Sobre la mezcla nivelada se coloca el elemento compactador y se realiza una compactación en cuatro periodos de 75 segundos, realizados girando el elemento compactador 90° en el mismo sentido, y sucesivamente, respecto a la posición inicial.

La altura de la probeta será correcta si esta dentro de ± 2 mm respecto a los bordes del molde para probetas de espesor ≤ 50 mm, y del 5% de tal espesor para probetas con espesor > 50 mm. Una vez terminada la compactación se enfría la muestra a temperatura ambiente durante 12-24 h, antes de ensayarla.

Las probetas se introducen en una estufa a $(60 \pm 2)^\circ \text{C}$ durante cuatro horas, como mínimo, antes de la ejecución del ensayo. Transcurrido este tiempo, se fija el molde con las pesas necesarias para conseguir una presión de 900KN/mm^2 , se cierra la cámara de la máquina de

ensayo, véase figura 8, y se espera unos 30 minutos para homogeneizar la temperatura de ensayo que debe ser de 60° C.



Figura 8. Máquina de ensayo

El ensayo consiste en someter la probeta al paso alternativo de la rueda durante un periodo de tiempo de 120 minutos sin interrupciones, o hasta que la deformación total alcance 15 mm, lo que ocurra antes, se realizan periódicamente las lecturas de la deformación en los minutos 1,3 y 5 contados a partir del comienzo del ensayo, a continuación cada 5 minutos hasta completar los 45 minutos y posteriormente cada 15 minutos hasta finalizar los 120 minutos de duración.

▪ 2.5.5.2. **Ensayo rodadura UNE-EN 12697-22**

Esta norma describe los métodos de ensayo a seguir para determinar la susceptibilidad de los materiales bituminosos a deformarse cuando están sometidos a carga.

El ensayo es aplicable a mezclas con tamaño máximo del árido menor o igual a 32mm.

Los ensayos son aplicables tanto a probetas preparadas en laboratorio, como probetas extraídas de un pavimento.

La susceptibilidad de los materiales a deformarse se evalúa por la rodera formada por pasadas repetidas, a Temperatura constante, de una rueda sometida a carga, véase figura 8.

De acuerdo con esta norma se pueden utilizar 3 tipos de dispositivos alternativos: dispositivos de tamaño grande, dispositivos de tamaño extragrande y dispositivos de tamaño pequeño. Con los dispositivos de tamaño grande y extragrande, las probetas se acondicionan

en aire durante el ensayo. Con los dispositivos de tamaño pequeño, las probetas se acondicionan en aire o en agua.

Según la Orden circular 2008 PG-3 (Ministerio de Fomento, 2008), en España el dispositivo que se debe emplear es el dispositivo pequeño, las probetas se acondicionan en aire según procedimiento B, a una temperatura de 60º C y con una duración de 10.000 ciclos.

La máquina de ensayo en pista utilizada para este dispositivo, consiste en una rueda sometida a carga que se mueve sobre una muestra sujeta de forma segura en una mesa. La rueda por encima de la mesa, se mueve hacia delante y hacia atrás, y un dispositivo proporciona el control de velocidad a la que se forma una rodera en la superficie de la probeta.

Se fabrican dos probetas paralelepípedas mediante el compactador de placa, véase figura 9, con el dispositivo de rodillo de acero, según la UNE-EN 12697-33 (AENOR, 2007f), con una densidad tal que:

- en mezclas con tamaño nominal D inferior o igual a 22 mm, sea superior al 98% de la obtenida en probetas cilíndricas preparadas según la UNE-EN 12697-30 (AENOR 2007d), aplicando 75 golpes por cara mezclas tipo AC y 50 golpes por cara para mezclas tipo BBTM.
- en mezclas con tamaño nominal mayor a 22 mm, sea superior al 98% de la obtenida en probetas preparadas por compactación vibratoria según la norma UNE-EN 12697-32 (AENOR, 2007e), durante un tiempo de 120 s por cara para mezclas tipo AC.



Figura 9. Compactador Segmentos de Rodillo

El espesor nominal de la probeta debe ser igual al espesor de la mezcla bituminosa que se utilizará en carretera, o en el caso de mezclas diseñadas para admitir una gama de espesores, debe ser el del punto en que la gama de espesores de diseño sea más próxima a:

- 25 mm para mezclas bituminosas cuyo tamaño máximo del árido de la mezcla sea < 8mm.
- 40 mm para mezclas bituminosas cuyo tamaño máximo del árido de la mezcla sea $\geq 8\text{mm}$ y < 16mm.
- 60 mm para mezclas bituminosas cuyo tamaño máximo del árido de la mezcla sea $\geq 16\text{mm}$ y $\leq 22\text{mm}$.
- 80 mm para mezclas bituminosas cuyo tamaño máximo del árido de la mezcla sea $> 22\text{mm}$ y $\leq 32\text{mm}$.

Una vez preparadas las probetas se mide el espesor en el punto medio de cada arista. Las cuatro mediciones obtenidas no deben diferir en más de 2,5mm con respecto al espesor nominal cuando éste sea menor que, o igual a 50 mm, ni en más del 5% del espesor nominal cuando éste sea mayor de 50 mm. El valor medio de estas cuatro mediciones se registra como el espesor de la probeta.

La cara que se vaya a someter a rodada no puede tener una distorsión superior a 2 mm.

Las probetas se ensayarán cuando hayan transcurrido más de dos días desde la compactación final. Todas las probetas pertenecientes a la misma serie de ensayos deben tener la misma edad.

Antes del ensayo, se acondicionan las probetas a 60°C, atendiendo al espesor, durante un periodo de tiempo mínimo de 4 horas, para probetas con un espesor nominal igual a, o menor de, 60mm. Y mínimo de 6 horas, para probetas con un espesor nominal mayor de 60mm. En ambos casos con un máximo de 24 horas.

Tras el acondicionamiento, la probeta se coloca en la máquina de ensayo en pista con una temperatura de 60° C. Se pone la máquina en movimiento y se toman lecturas de desplazamiento vertical de la rueda, primero la lectura inicial y después 6 ó 7 veces como mínimo en la primera hora, posteriormente, es necesaria al menos una lectura cada 500 ciclos de carga. El ensayo de pista se continúa hasta que se apliquen 10000 ciclos de carga, o hasta que la profundidad de la rodera sea de 20 mm, lo que ocurra antes.

▪ 2.5.5.3. Ensayo NLT-173 frente a UNE-EN 12697-22

El objeto de ambos métodos de ensayo es determinar la susceptibilidad de los materiales bituminosos a deformarse cuando están sometidos a carga.

Sin embargo hay diferencias significativas en los procedimientos de ensayo, que se presentan a continuación:

NÚMERO DE PROBETAS

Con la norma española NLT-173 (CEDEX, 2000c) se fabrican para cada ensayo un mínimo de 3 probetas; en la norma europea UNE-EN 12697-22 (AENOR, 2008d) el número de probetas necesarias es 2.

DIMENSIONES DE LAS PROBETAS

Los moldes y las probetas que se detallan en la norma NLT-173 (CEDEX, 2000c) son de forma prismática, aunque el procedimiento general de ensayo puede tener aplicaciones a probetas de otras formas. El molde tiene unas dimensiones interiores de (300× 300) mm.

En la norma UNE-EN 12697-22 (AENOR, 2008d), dispositivo de tamaño pequeño procedimiento B, dispositivo que se utiliza en España, no especifica las medidas internas del molde, aunque establece que para dispositivos de tamaño pequeño las dimensiones de la probeta deben ser de (260×300) mm como mínimo.

El espesor de la probeta varía con el tamaño máximo del árido, como se ha comentado anteriormente.

COMPACTACIÓN DE LAS PROBETAS

Las probetas que se ensayan en el método europeo, son compactadas de acuerdo con la norma UNE-EN 12697-33 (AENOR, 2007f). Esta norma especifica los métodos de compactación de probetas en forma de paralelepípedo de mezclas bituminosas. Los métodos de compactación que se describen son tres: el método del neumático, del rodillo de acero o de deslizamiento de placas.

Las probetas se preparan, bien sometiéndolas a una energía de compactación controlada o bien hasta que se obtiene un volumen especificado y por tanto un contenido de huecos también especificado.

Cuando se utiliza un rodillo liso de acero, véase figura 9, para compactar se realiza:

- Mediante una energía especificada se aplica una carga fija hasta que se alcanza el número de pasadas requerida.
- Si se compacta con energía controlada, la precarga y la carga se aplican paso a paso aumentando la carga después de cada pasada del rodillo.
- Para obtener un contenido de huecos o un grado de compactación especificado se empleará una energía constante o bien una energía de compactación controlada.

En la norma española NLT-173 (CEDEX, 2000c), la compactación de la mezcla dentro de los moldes se realiza mediante una placa de acero sobre la que van montados dos vibradores iguales, este método de compactación no se contempla en la norma UNE-EN, véase figura 8.

ACONDICIONAMIENTO DE LAS PROBETAS

La norma NLT-173 (CEDEX, 2000c) especifica que las probetas se deben introducir en una estufa regulada a $(60 \pm 2)^\circ \text{C}$ durante cuatro horas como mínimo antes de la ejecución del ensayo.

En el ensayo de rodadura UNE-EN 12697-22 (AENOR, 2008d), el tiempo de acondicionamiento de las probetas va a ser distinto dependiendo del tamaño nominal del árido, como se ha comentado en el apartado 2.4.5.2.

La temperatura de acondicionamiento y de ensayo en este caso, para el dispositivo pequeño Procedimiento B en aire, según la tabla D.1 de la norma UNE-EN 13108-20 (AENOR, 2007g), podrá ser 45, 50 ó 60° aunque según el PG-3 (Ministerio de Fomento, 2008) especifica una temperatura de 60°C .

EQUIPO DE ENSAYO

Entre los dispositivos que se pueden utilizar en la norma europea, el dispositivo de tamaño pequeño es el que más se asemeja a la máquina de ensayo de la antigua norma española. Ambos consisten en un carretón móvil que se mueve hacia delante y hacia atrás, por encima del carretón va situada una rueda montada en un brazo sustentador. En uno de los lados del carretón móvil lleva un dispositivo de medida. Tanto la anchura como el diámetro de la rueda, el recorrido de la rueda sobre la probeta de ensayo, así como el dispositivo para medir la posición vertical de la rueda son iguales, figura 10.



Figura 10. Equipo de ensayo utilizado con ambas normas

En cambio se diferencian en:

➤ *Frecuencia de movimiento*

En la norma europea la frecuencia es de $(26,5 \pm 1,0)$ ciclos de carga cada 60 s, sin embargo en la norma española esta frecuencia es de 42 pasadas por minuto, es decir, 21 ciclos de carga cada 60 s.

➤ *Carga aplicada a la rueda*

En la norma UNE-EN 12697-22 (AENOR, 2008d) la carga aplicada a la rueda bajo condiciones de ensayo estándar debe ser 700 N, mientras que en la norma NLT la presión de contacto de la rueda sobre la superficie de la probeta es de 900 KN /m^2 .

➤ *Duración del ensayo*

El ensayo de pista con el Procedimiento B en aire, dispositivo pequeño, finaliza cuando se apliquen 10000 ciclos de carga, o hasta que la profundidad de la rodera sea de 20 mm, lo que ocurra antes. En la norma NLT-173 el ensayo dura un periodo de tiempo de 120 minutos o hasta que la deformación total alcance 15mm si ocurre antes.

EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

En la norma europea UNE-EN 12967-22 (AENOR, 2008d): Procedimiento B en aire, se determina la pendiente de deformación en pista, en mm para 10.000 ciclos de carga, con la profundidad de la rodera entre los ciclos 5.000 y 10.000 ciclos

$$WTS_{\text{AIRE}} = (d_{10.000} - d_{5.000}) / 5$$

También se especifica la profundidad media de la rodera (RD_{AIRE}), en mm, así como el porcentaje de la profundidad media de la rodera, PRD_{AIRE} , en %.

En el antiguo método utilizado en España, se determina la velocidad de deformación media correspondiente al intervalo de tiempo t_2/t_1 , expresado en $\mu\text{m/min}$

$$V_{t_2} / V_{t_1} = (d_{t_2} - d_{t_1}) / t_2 - t_1$$

Y se obtiene la deformación total al final del ensayo, expresada en mm.

En la siguiente tabla se recogen las principales diferencias entre ambos métodos de ensayo:

	ENSAYO RODADURA UNE-EN12697-22. Procedimiento B en aire	ENSAYO PISTA NLT-173
Compactación probetas	Compactador de placas de rodillo de acero (UNE-EN 12697-33)	Placa vibrante
Nº de probetas	2	3
Dimensiones probetas	260x320 mm	300x300 mm
Temperatura acondicionamiento	- Espesor ≤ 60 mm 4 horas - Espesor > 60 mm 6 horas	Mínimo 4 horas
Cargas	700 N	900 KN/mm ²
Frecuencia	26,6 ciclos/min.	21 ciclos/min.
Tiempo de ensayo	377 min. ó deformación = 20 mm	120 min. ó deformación = 15 mm
Expresión resultados	$WTS_{AIRE} = \frac{(d_{10.000} - d_{5.000})}{5}$ (mm/10 ³ ciclos) - Deformación de la rodera (mm) - Deformación proporcional rodera (%)	Velocidad de deformación $V_{t2}/V_{t1} = (d_{t2} - d_{t1})/t_2 - t_1$ (μm/min.) V105/120 - Deformación total (mm)

Tabla 5. Diferencias entre UNE-EN 12697-22 y NLT-173

2.5.6. Consideraciones finales

Son muchos los ensayos de laboratorio que tienen la finalidad de evaluar las deformaciones plásticas que se producen en el firme y se pueden dividir en tres grupos: ensayos fundamentales, empíricos y de simulación.

En este trabajo se han estudiado gran parte de ellos pero se ha prestado especial atención a los ensayos de simulación, más concretamente en dos de ellos: ensayo de rodadura mediante UNE-EN 12697-22 y el ensayo al que sustituye, NLT-173.

Los ensayos fundamentales tienen la ventaja de que permiten encontrar ecuaciones constitutivas en función de las tensiones y condiciones de servicio, pero la mayoría de estos ensayos necesitan dispositivos que son costosos y algunos son difíciles de utilizar.

Los ensayos empíricos necesitan de otros ensayos adicionales y son muy poco utilizados para determinar deformaciones plásticas.

Son los ensayos de simulación los que más se utilizan en los distintos países debido a que simulan lo que realmente sucede en un firme cuando están sometidos a cargas de tráfico. Sus resultados permiten establecer una clasificación de las mezclas respecto a su comportamiento frente a la deformación permanente, actúan como ensayos del tipo “se

acepta/no se acepta". Si el resultado del ensayo es mayor al valor especificado para un tipo de mezcla bituminosa, la mezcla se rechaza y se dice que sufre deformaciones plásticas.

En España, al cambiar el ensayo que se había utilizado para tal fin, debido al Mercado CE, el valor que determinaba si la mezcla bituminosa era aceptada o no también ha cambiado. Tras la implantación, se detecta que algunas de las mezclas que con la normativa NLT resultaban aptas para su puesta en obra, con los ensayos UNE-EN no cumplen las especificaciones técnica exigidas. Es por ello por lo que se realiza este trabajo de investigación, para comprobar la equivalencia entre ambos límites de especificación para los dos ensayos.



3. METODOLOGÍA

3. METODOLOGÍA

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se desarrolla la metodología llevada a cabo para alcanzar los objetivos propuestos en la presente tesis doctoral.

Este trabajo de investigación se centra en el comportamiento de un tipo de mezcla bituminosa en caliente tipo hormigón bituminoso, frente a la acción del agua y las deformaciones plásticas, atendiendo a diferentes procedimientos de ensayo definidos en la normativa NLT y UNE-EN.

Para la realización de los trabajos de esta investigación es necesario, en primer lugar, la elección de la mezcla bituminosa para el estudio así como el plan de ensayos que se llevará a cabo en el laboratorio para alcanzar los objetivos propuestos. Una vez definido el plan de ensayos se fabrican las probetas necesarias para la realización de los diferentes ensayos.

Para poder extraer conclusiones estadísticamente válidas acerca de una población a partir de los resultados muestrales, es necesario suponer la “hipótesis de normalidad” o “comprobar la normalidad” de los datos muestrales estudiados, para lo cual se puede emplear el Teorema Central del Límite, que permite garantizar que la distribución de los datos muestrales sigue una normal cuando el tamaño de la muestra es suficientemente grande (mayor a 30) (Peña, 1994).

Partiendo de esta premisa se decide ensayar un mínimo de 30 muestras, en concreto 33, del mismo tipo de mezcla. Realizando el análisis estadístico de los resultados obtenidos de los distintos ensayos ejecutados sobre estas muestras.

3.2 MATERIALES

En esta investigación, se ha seleccionado la mezcla denominada AC16 Surf 35/50 S, con árido grueso de naturaleza ofítica y árido fino y filler de naturaleza calcárea. Dicha mezcla pertenece al tipo genérico de hormigón bituminoso, pudiendo ser utilizada en todas las capas del firme, característica que la ha convertido en una de las mezclas bituminosas más utilizadas en España. Las muestras de dicha mezcla bituminosa en caliente, fueron facilitadas por la planta La Atalaya (Utrera, Sevilla) de Eiffage- Infraestructuras.

Las características de los áridos utilizados en la fabricación de la mezcla bituminosa, se encuentran recogidas en la tabla 6 y cumplen con las especificaciones del PG-3 (Ministerio de Fomento, 2008).

Árido Grueso Ofítico			Límite PG-3
Proporción de Partículas Trituradas (UNE-EN 933-5)	100		100%
Forma del Árido Grueso. Índice de Lajas. (UNE-EN 933-3)	14,7		≤20
Resistencia a la Fragmentación (Coef. Los Ángeles, UNE-EN 1097-2)	14,1		≤20
Resistencia al Pulimento (CPA, Anexo D UNE 146130)	54,5		≥50
Limpieza. Contenido de Impurezas (Anexo C UNE 146130)	0,04		<0,5%
Densidad Relativa y Absorción (UNE-EN 1097-6)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Absorción del agua tras inmersión (%)	-
	2,84	0,52	-
Árido Fino Calizo			Límite PG-3
Equivalente de Arena (UNE-EN 933-8)	53,3		>50
Densidad Relativa y Absorción (UNE-EN 1097-6)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Absorción del agua tras inmersión (%)	-
	2,7	0,9	-
Polvo mineral Calizo			Límite PG-3
Densidad aparente del filler en queroseno (UNE-EN 1097-3.Anexo A)	0,67		0,5-0,8 g/cm ³

Tabla 6. Características de los áridos

El betún utilizado es un betún convencional con un grado de penetración 35/50, véase tabla 7

Betún 35/50	Mínimo	Máximo
Penetración 25 °C (UNE-EN 1426) (0,1 mm)	35	50
Punto de Reblandecimiento (UNE-EN 1427) (°C)	50	58
Punto de rotura Fraass (UNE-EN 12593)	-	-5

Tabla 7. Características del betún

La curva granulométrica de la mezcla bituminosa en caliente, se ajusta al huso fijado en el PG-3 (Ministerio de Fomento, 2008) véase figura 11.

El contenido óptimo de betún empleando en la fabricación de la mezcla bituminosa en caliente es de 4,58% sobre el peso total de la mezcla. Este porcentaje de betún será el utilizado para la fabricación de cada una de las mezclas de estudio.

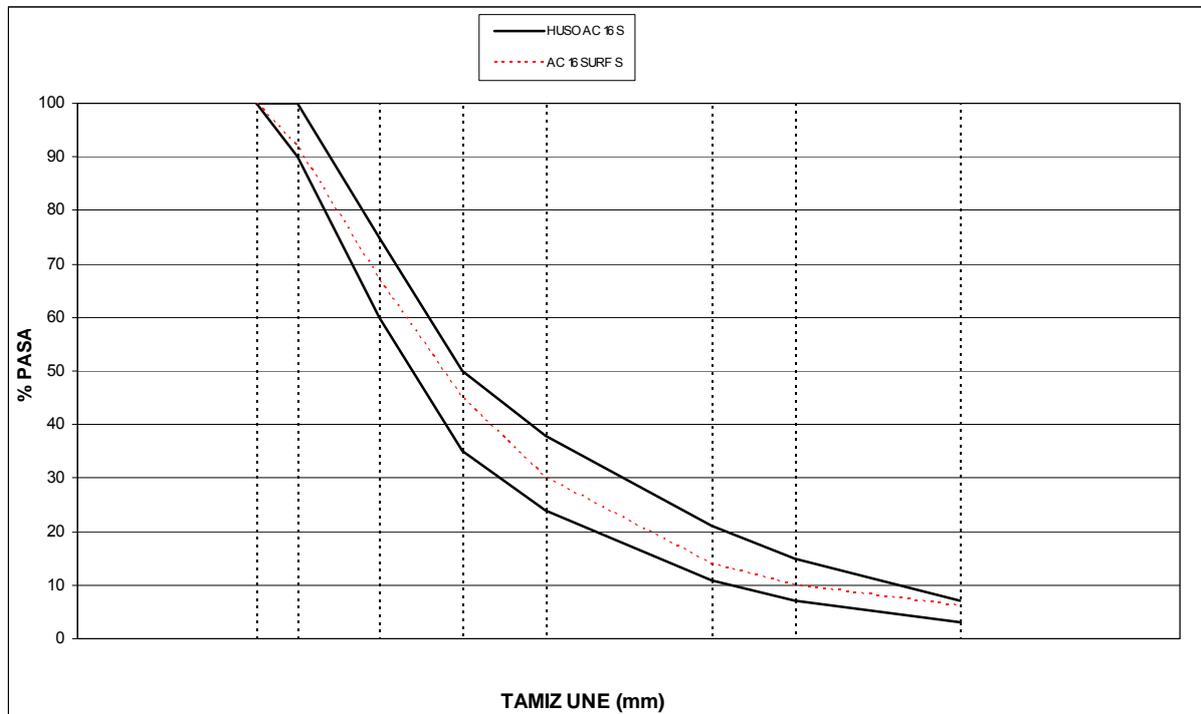


Figura 11. Curva granulométrica

Cada una de las mezclas fabricadas se cuartean y reservan para llevar a cabo los distintos ensayos.

Para facilitar el trabajo de laboratorio se decide identificar las muestras recogidas mediante un número seguido de una letra, el número corresponde a la amasada y la letra a la fecha en la que se fabricó dicha amasada.

3.3. PLAN DE ENSAYOS

El plan de ensayos de esta tesis doctoral plantea la fabricación y ensayo de al menos, 528 probetas cilíndricas así como 165 probetas paralelepípedas, puesto que se pretende utilizar un total de 33 muestras de un mismo tipo de mezcla bituminosa en caliente.

Todos los trabajos de laboratorio han sido desarrollados en el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción, labIC, de la Universidad de Granada.

En los siguientes epígrafes se describe la metodología seguida en el laboratorio para la realización de los diferentes ensayos.

3.3.1. Análisis del efecto del agua sobre las mezclas bituminosas

Se lleva a cabo un estudio comparativo para analizar el efecto del agua en las mezclas bituminosas entre el ensayo de inmersión-compresión, recogido en la normativa NLT-162 y el ensayo que lo sustituye, ensayo de sensibilidad al agua, recogido en UNE-EN 12697-12. Ambos ensayos se realizan con un procedimiento diferente, utilizando distintos tipos de compactación, acondicionamiento, y tipo de carga aplicadas a las probetas. El resultado obtenido en uno y otro es un índice de resistencia conservada entre el grupo de probetas acondicionadas y sin acondicionar, como ya se ha comentado en el capítulo anterior.

A modo de esquema se presenta la figura 12 que recoge las distintas etapas de las que consta el trabajo de laboratorio para estos ensayos:

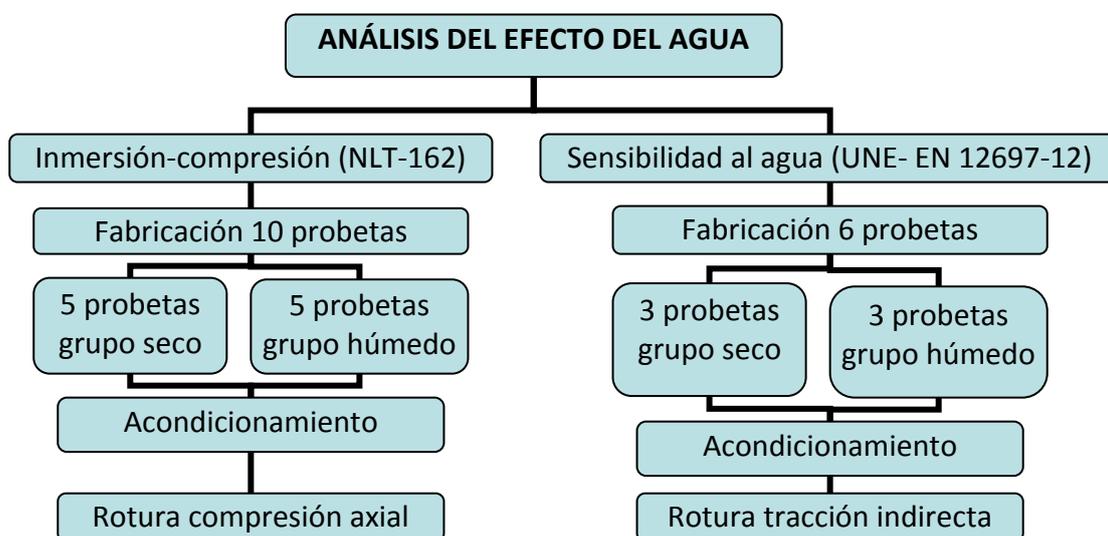


Figura 12. Esquema trabajo en laboratorio ensayos análisis del efecto del agua.

El **ensayo de inmersión-compresión según NLT-162/00** consiste en la preparación de diez probetas cilíndricas de 101,6 mm de diámetro por 101,6 mm de altura, según NLT-161 (CEDEX, 1998) (Resistencia a compresión simple de mezclas bituminosas), para ello se utilizan 20 Kg de muestra. Cada una de las probetas requiere entre 1,9-2,0 Kg de muestra, dependiendo de la densidad de la mezcla.

Para determinar la densidad de la mezcla, se fabrican tres probetas cilíndricas según la norma NLT-159 (CEDEX, 2000a). La mezcla se introduce en una estufa para conseguir la temperatura de compactación, establecida en torno a 150-160 °C. Una vez alcanzada dicha temperatura, se vierte la mezcla en el conjunto de compactación aplicando 75 golpes por cara. Antes de que pasen 24 horas, se determina la densidad aparente de la mezcla bituminosa según NLT-168 (CEDEX, 1990) mediante el procedimiento de superficie saturada seca. Para ello se pesa la probeta y se sumerge en un baño de agua a 25°C, a continuación se

determina su masa sumergida, suspendiéndola del dispositivo que para tal fin debe llevar la balanza. Seguidamente se seca la superficie de la muestra y se pesa.

Una vez determinada la densidad de la mezcla, se procede a la fabricación de las diez probetas. Se calienta la mezcla en la estufa a temperatura de compactación (150-160° C), así como los moldes y pistones de compactación. Cuando los moldes han alcanzado la temperatura de compactación se sacan de la estufa, se engrasan y se sitúan sobre el pistón inferior, intercalando dos varillas soporte. A continuación, se vierte la mitad de la mezcla en el molde y se distribuye mediante 25 golpes con una espátula caliente. Los 15 primeros golpes en la periferia y los restantes al azar. La espátula debe penetrar lo más profundamente posible en la mezcla. Seguidamente se vierte el resto de la mezcla y se aplican otros 25 golpes, procurando darle un acabado ligeramente cónico o esférico para facilitar el asentamiento del pistón superior.

Una vez que la mezcla se encuentra acomodada en el molde, se procede a colocar el pistón superior, manteniendo las varillas soporte, y aplicando una presión de asentamiento de 1 MPa (10 Kgf/cm²). En este momento, se retiran las dos varillas soporte para proceder a la compactación definitiva de la mezcla mediante la aplicación de una carga creciente, regulando la velocidad para alcanzar en 3 minutos una presión máxima de 21 MPa (210 Kgf/cm²), manteniendo esta presión sobre la mezcla 2 minutos. Para probetas normalizadas de 101,6 mm de diámetro, esta presión viene a representar una carga de 170 KN.

Las diez probetas se dejan enfriar dentro del molde durante dos horas, pasado este tiempo se extraen de los moldes y se dejan al aire durante dieciocho horas antes de ensayarlas. Transcurrido este tiempo, se determina la densidad relativa de las probetas según la norma NLT-168 (CEDEX, 1990) mediante el método saturado superficie seca. Una vez que se ha determinado la densidad, las diez probetas fabricadas se dividen en dos grupos de cinco, de manera que la densidad relativa media de cada uno sea aproximadamente la misma. A continuación se procede al acondicionamiento de las probetas según el *Procedimiento 2* de NLT-162 (CEDEX, 2000b): *Inmersión a 60°C*.



Figura 13. Probetas grupo seco del ensayo de inmersión-compresión

Las cinco probetas del primer grupo, véase figura 13, se colocan en una estufa regulada a 25° C durante 24 horas. Transcurrido este tiempo se sacan de la estufa y se introducen en un baño de agua a 25 °C durante dos horas. Para determinar la resistencia a compresión de cada una de las probetas, de acuerdo con la norma NLT-161 (CEDEX, 1998), se coloca la probeta en el centro de la placa de carga de la máquina de ensayo y se somete a compresión axial, figura 14, a una velocidad de deformación constante equivalente a 0,05 mm/min por milímetro de altura de la probeta. Para probetas normalizadas de 101,6 mm de diámetro, este valor representa una velocidad de deformación de 5,08 mm/min.



Figura 14. Rotura probetas en el ensayo de inmersión-compresión

Las cinco probetas del segundo grupo se sumergen en un baño de agua regulado a 60 °C durante veinticuatro horas, figura 15.



Figura 15. Probetas grupo húmedo del ensayo de inmersión-compresión

Pasado este tiempo se sacan del baño y se mantienen dos horas a temperatura ambiente. Seguidamente las probetas son colocadas en un baño de agua regulado a 25 °C durante otras dos horas, determinando a continuación la resistencia a compresión de acuerdo con la norma NLT-161 (CEDEX, 1998), como el grupo 1.

Finalmente, se calcula el valor medio de la resistencia a compresión simple de cada grupo de probetas. Con estos valores se calcula el índice de resistencia conservada, o susceptibilidad al agua, por medio de la siguiente expresión:

$$\text{Índice de resistencia conservada, \%} = (R_2/R_1) \times 100$$

donde

R_1 valor medio de la resistencia a compresión de las probetas no sumergidas (grupo 1)

R_2 valor medio de la resistencia a compresión de las probetas sumergidas (grupo 2)

En el caso del **ensayo de sensibilidad al agua según la norma UNE-EN 12697-12:2009**, se fabrican seis probetas de $(63 \pm 2,5)$ mm de altura y $(101,6 \pm 0,1)$ mm de diámetro, figura 16, para cada una de las 33 muestras a estudiar.



Figura 16. Probetas del ensayo de sensibilidad al agua

Se utilizan aproximadamente 7,2 Kg de mezcla en la fabricación de las seis probetas, lo que equivale a 1,2 Kg para cada una de ellas. Para la fabricación de las probetas cilíndricas se utiliza el compactador de impactos de acuerdo con la Norma UNE-EN 12697-30 (AENOR, 2007d). La mezcla se trasfiere a un molde de acero de compactación y se aplican 50 golpes por cara mediante un martillo compactador.

Una vez finalizado el proceso de compactación, se deja enfriar la probeta para determinar su densidad aparente de acuerdo con la norma UNE-EN 12697-6 (AENOR, 2007a) y sus dimensiones según la norma UNE-EN 12697-29 (AENOR, 2003 b), figura 17.



Figura 17. Toma dimensiones probetas del ensayo de sensibilidad al agua

Dentro de la norma UNE-EN 12697-6 (AENOR, 2007a) se describen distintos métodos de ensayo para la determinación de la densidad aparente de una probeta bituminosa compactada, al igual que ocurre en la norma NLT-168 (CEDEX, 1990).

La elección del método a utilizar depende del contenido estimado de huecos aire (H_m) en la probeta y de la accesibilidad de los mismos.

La mezcla elegida para este estudio, AC 16 Surf 35/50 S, es una mezcla con $H_m < 7\%$, por lo que el procedimiento elegido es el Procedimiento B: Densidad aparente- Superficie saturada seca (SSD).

Este procedimiento es adecuado para medir la densidad aparente de probetas bituminosas con una baja relación de huecos y un bajo nivel de absorción de agua o un desagüe lento del agua absorbida.

Para ello se pesa la probeta seca y seguidamente se sumerge en un baño hasta saturarla de agua (aproximadamente 30 minutos), figura 18A. Se mide la temperatura del agua y se determina su densidad (ρ_w). A continuación se pesa la probeta saturada cuando está sumergida, figura 18B. No deben quedar burbujas de aire adheridas a la superficie de la probeta. Para finalizar, se extrae la probeta del agua y se eliminan las gotas adheridas a la superficie con una gamuza, figura 18C, determinando su masa.



A. Saturación de probetas

B. Peso probeta sumergida



C. Secado con gamuza

Figura 18. Densidad según UNE-EN 12697-6 (AENOR, 2007a) procedimiento B:SSD

Se dividen las probetas en dos grupos, que se denominan grupo de probetas secas y grupo de probetas húmedas, cada uno de ellos con tres probetas, con aproximadamente la misma longitud media (la diferencia no debe ser mayor de 5 mm) y la misma densidad aparente media (la diferencia no debe ser mayor de 15Kg/m^3).

Las probetas deben tener la misma edad y dejar un tiempo de curado de 16 horas como mínimo antes de comenzar el acondicionamiento.

El grupo de probetas secas se mantiene sobre una superficie plana, a una temperatura de $(20\pm 5)^\circ\text{C}$ durante unas 72 horas, figura 19. Transcurrido este tiempo, se pone a temperatura de ensayo, 15°C , introduciéndolas en una cámara de aire durante dos horas. Una vez finalizado el acondicionamiento se determina la resistencia a la tracción indirecta de las probetas según Norma EN 12697-23 (AENOR, 2004b).



Figura 19. Probetas grupo seco del ensayo de sensibilidad al agua

Mientras, el grupo de probetas húmedas se coloca en el recipiente de vacío, lleno de agua destilada a $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ sobrepasando la superficie superior de las probetas como mínimo 20 mm. Se aplica vacío hasta una presión absoluta de (6.7 ± 3) KPa en 10 minutos, manteniendo el vacío durante 30 minutos. Pasado este tiempo se deja que se recupere la presión atmosférica en el recipiente de vacío y se mantienen sumergidas en el agua durante 30 minutos, figura 20.



Figura 20. Probetas grupo húmedo del ensayo de sensibilidad al agua en recipiente de vacío

A continuación se miden las dimensiones de las probetas según EN 12697-29 (AENOR, 2003b), efectuando cuatro mediciones uniformemente espaciadas alrededor del perímetro de cada probeta en cada dirección, altura y diámetro, calculando su volumen. Se rechazan las que hayan aumentado el volumen más de un 2%.

Posteriormente se colocan en un baño de agua a $40 ^\circ\text{C}$ durante 72 horas, figura 21.

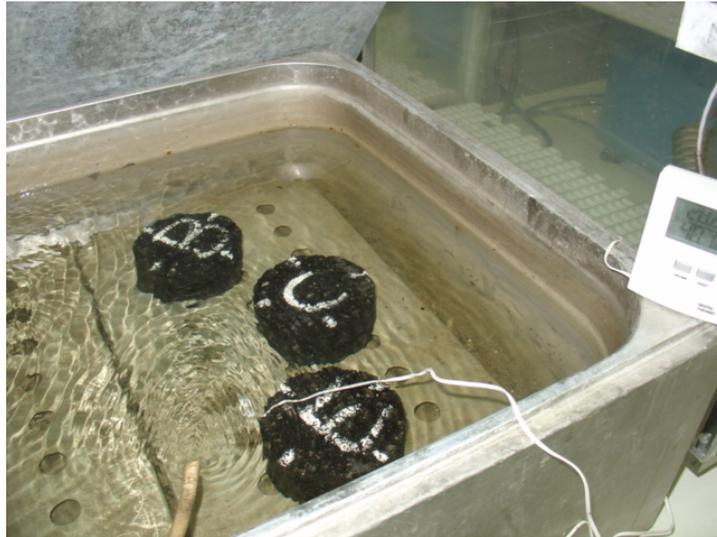


Figura 21. Probetas grupo húmedo del ensayo de sensibilidad al agua en baño de agua a 40°C

Finalizado este periodo de tiempo, las probetas se ponen a la temperatura de ensayo, 15 ° C, colocándolas directamente en un baño de agua durante 2 horas. A continuación se determina la resistencia a la tracción indirecta de las probetas según Norma EN 12697-23 (AENOR, 2004b), antes de que transcurra 1 minuto tras sacar la probeta del agua de acondicionamiento.

Para determinar la resistencia a la tracción indirecta, se colocan las probetas alineadas sobre la banda de carga inferior, de forma que la carga se puede aplicar diametralmente en el bastidor de ensayo, figura 22.



Figura 22. Rotura probetas en el ensayo de sensibilidad al agua

A continuación se inicia la compresión de la probeta aplicando una carga diametral a una velocidad constante de deformación de (50 ± 2) mm/min, hasta que alcance la carga máxima aplicada, P. Para cada probeta se calcula la resistencia a tracción indirecta, ITS, aplicando la siguiente fórmula:

$$ITS = 2P / \pi DH$$

donde

P es la carga máxima

D es el diámetro de la probeta

H es la altura de la probeta

Finalmente se calcula el valor medio de cada grupo de probetas.

Después se continúa aplicando carga hasta que se produzca la rotura de la probeta. Se registra el tipo de rotura, véase figura 23:

- “Rotura limpia por tracción”. La probeta se rompe de forma limpia a lo largo de una línea diametral, con la posible excepción de pequeñas secciones triangulares próximas a las bandas de carga.
- “Deformación”. Las probetas no presentan una línea de rotura claramente visible.
- “Combinación”. Las probetas presentan una línea de rotura limitada y áreas deformadas más grandes, próximas a las bandas de carga.

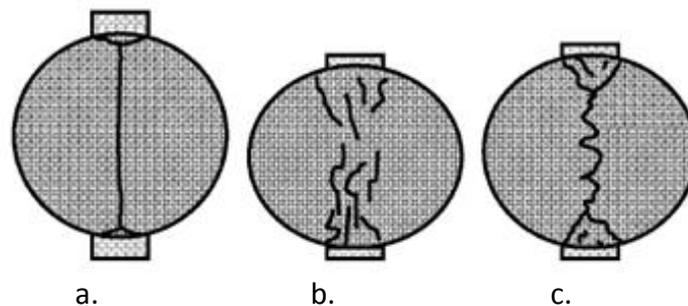


Figura 23. Tipos de roturas
Fuente: UNE-EN 12697-23 (AENOR, 2004b)

La relación de resistencia a la tracción indirecta, ITSR, se calcula aplicando la siguiente fórmula:

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d}$$

donde

ITSR es la razón de la resistencia a la tracción indirecta

ITS_w es la resistencia a la tracción indirecta del grupo de probetas húmedas

ITS_d es la resistencia a la tracción indirecta del grupo de probetas secas.

3.3.2. Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante ensayo en pista

Para determinar la resistencia a deformaciones plásticas de la mezcla bituminosa objeto de estudio y alcanzar los objetivos propuestos en esta tesis doctoral, se han fabricado series de probetas que serán ensayadas mediante dos ensayos, el ensayo en pista de laboratorio (NLT-173/00) y el ensayo de rodadura que sustituye al anterior bajo normativa UNE-EN.

A modo de esquema se presenta la figura 24 que recoge las distintas etapas de las que consta el trabajo de laboratorio para estos ensayos:

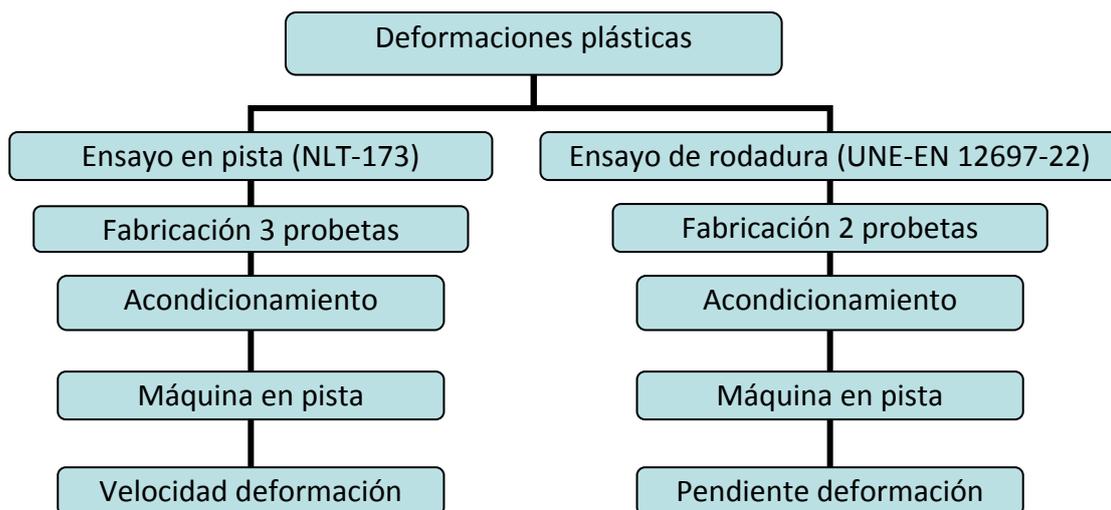


Figura 24. Esquema trabajo en laboratorio ensayos deformaciones plásticas.

El proceso llevado a cabo en el laboratorio, es el que se desarrolla a continuación.

En el caso de **pista de ensayo de laboratorio NLT-173 (CEDEX, 2000c)**, se fabrican 3 probetas. La masa de cada una de las probetas se calcula a partir del volumen del molde y la densidad relativa Marshall de la mezcla (densidad obtenida de fabricar probetas aplicando 75 golpes por cara mediante el compactador de impactos).

El molde y el collarín, se calientan en una estufa a 175º C (15 ºC superior a la temperatura de compactación). Cuando alcanza la temperatura se coloca el molde sobre la base de compactación en su anclaje y se monta el collarín añadiendo la mezcla, que previamente se

habrá calentado a 170° C (10 ° C superior a la de compactación), y se distribuye uniformemente.

Tras enrasar la mezcla se coloca el elemento compactador y se realiza una compactación inicial de 75s con una fuerza de 3KN, posteriormente se desmonta el collarín que se sustituye por los cuatro angulares colocados en los vértices del molde. A continuación se completa la compactación mediante otros 3 periodos de 75 s cada uno, realizados girando el elemento compactador 90° en el mismo sentido, y sucesivamente, respecto a la posición inicial, figura 25. La compactación se acepta como correcta siempre que la altura de la probeta esté dentro de ± 2 mm respecto a los bordes del molde para probetas con espesor ≤ 50 mm y del 5% de tal espesor para probetas con espesor ≥ 50 mm.



Figura 25. Compactación probetas del ensayo en pista

Se deja enfriar la mezcla a temperatura ambiente durante un periodo de entre 12 y 24 horas y se retira el molde, figura 26.



Figura 26. Probetas del ensayo en pista

Se determina la densidad mediante el procedimiento superficie saturada seca NLT-168 (CEDEX, 1990) comprobando que ha alcanzado como mínimo el 97% de la densidad obtenida

mediante la fabricación de probetas compactadas por impactos con 75 golpes por cara según NLT-159 (CEDEX, 2000a), como se ha comentado en el epígrafe anterior.

Se introducen las probetas frías en una estufa regulada a 60°C durante cuatro horas.

Dos horas antes del comienzo del ensayo se regula a 60°C la cámara termostática de la máquina de ensayo. Transcurrido este tiempo, se saca la primera probeta de la estufa, y se fija al molde mediante los anclajes que posee el carretón móvil. En estas condiciones, se carga el brazo soporte con las pesas necesarias para conseguir la presión, se cierra la cámara y se espera unos 30 minutos con objeto de homogeneizar la temperatura de ensayo, figura 27.



Figura 27. Probeta preparada para iniciar el ensayo en pista

Seguidamente se pone en movimiento el carretón durante un periodo de tiempo de 120 minutos sin interrupciones, o hasta que la deformación total alcance 15 mm, lo que ocurra antes, haciendo periódicamente las correspondientes lecturas de deformación. Una vez finalizado el ensayo, se detiene la máquina, se levanta la rueda, y se extrae la probeta ensayada. A continuación, se coloca la siguiente probeta y se repite el mismo procedimiento de ensayo que se ha descrito.

A partir de las deformaciones, d_t , correspondientes a los tiempos t del ensayo, se calcula mediante:

$$V_{t2}/V_{t1} = \frac{d_{t2} - d_{t1}}{t_2 - t_1}$$

la velocidad, V , de deformación media correspondiente al intervalo de tiempos t_2/t_1 , parámetro que vendrá expresado en $\mu\text{m}/\text{min}$.

Por otro lado, para la realización del **Ensayo de rodadura mediante la norma UNE-EN 12697-22:2008+A1**, se fabrican dos probetas que son compactadas en sus moldes de acuerdo con la norma EN 12697-33 (AENOR, 2007f) utilizando el método del rodillo de acero. 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.

La masa, M , de la mezcla bituminosa que se introduce en el molde se calcula atendiendo a la siguiente expresión:

$$M = 10^{-6} \times L \times l \times e \times \rho_m \times (100 - v) / 100$$

donde

M es la masa de la placa de mezcla bituminosa (kg);

L es la longitud interior del molde (mm);

l es la anchura interior del molde (mm);

e es el espesor final de la placa de mezcla bituminosa (mm);

ρ_m es la densidad máxima de la mezcla bituminosa (kg/m^3);

v es el contenido de huecos en la placa de mezcla bituminosa (%).

La densidad aparente, ρ , obtenida mediante el compactador de impactos (AENOR, 2007d) aplicando 75 golpes por cara, sustituye a $\rho_m \times (100 - v) / 100$ recogido en la norma UNE-EN 12697-33 (AENOR, 2007f), obteniendo esta expresión:

$$M = 10^{-6} \times L \times l \times e \times \rho$$

La mezcla se vierte en el molde, precalentado hasta la temperatura de compactación y se aplica la carga mediante un segmento de rodillo que se desplaza de derecha a izquierda durante el proceso de compactación, figura 28.



Figura 28. Compactación probetas del ensayo de rodadura

Cuando la compactación ha terminado se deja que la probeta se enfríe a temperatura ambiente antes de extraerla del molde. Las probetas tienen las siguientes dimensiones: 408×256×60 mm, figura 29.



Figura 29. Probeta del ensayo de rodadura

Una vez extraída la probeta se determina la densidad según UNE-EN 12697-6 Procedimiento B superficie saturada seca (AENOR, 2007a) y se comprueba que ha alcanzado como mínimo el 98% de la densidad aparente obtenida mediante la fabricación de probetas con el compactador de impactos (75 golpes/cara).

Como se comenta en el capítulo anterior de esta tesis doctoral, en la norma UNE-EN 12697-22 (AENOR, 2008d), Ensayo de rodadura, se pueden utilizar tres tipos alternativos de dispositivo, el que se utiliza en España es el Dispositivo de tamaño pequeño: procedimiento B en aire.

La probeta que se ensaya se fija al molde y se sujeta a la placa de soporte situada en la máquina en pista. Antes de poner la máquina en movimiento, la probeta se acondiciona a 60º C, durante 4 h como mínimo, figura 30.



Figura 30. Probeta preparada para iniciar el ensayo de rodadura

Transcurrido este periodo de tiempo, la máquina se pone en movimiento y se toman lecturas del desplazamiento vertical de la rueda, en primer lugar la lectura inicial y posteriormente 7 lecturas como mínimo en la primera hora. Tras esta primera hora, es necesario tener al menos una lectura cada 500 ciclos de carga. El ensayo de pista se continúa hasta que se apliquen 10.000 ciclos de carga, o hasta que la profundidad de la rodera sea de 20 mm, lo que ocurra antes.

Terminado el ensayo se introduce la siguiente probeta siguiendo el mismo procedimiento.

Con los datos obtenidos del ensayo, se determina la pendiente de deformación en pista, expresada en mm por 10.000 ciclos de carga, con la profundidad de la rodera entre los ciclos 5.000 y 10.000 ciclos según la siguiente expresión

$$WTS_{AIRE} = (d_{10.000} - d_{5.000}) / 5$$

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS

Con los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos se realiza el tratamiento estadístico que se describe a continuación:

Para comprobar si la relación entre los valores observados de cada par de ensayos es lineal, se recurre a la regresión lineal simple, a partir de la cual, se obtienen los coeficientes para ajustar una línea recta a los diversos pares de valores proporcionados por las muestras.

En todos los casos estudiados se asume que la variable explicativa o independiente, X, viene determinada por los valores de los ensayos proporcionados por la normativa NLT, y que la variable explicada o dependiente, Y, corresponde a los valores de los ensayos proporcionados por la normativa UNE-EN.

La variable dependiente, Y, ocupa la ordenada en unos ejes cartesianos y la variable independiente, X, el lugar de la abscisa. El modelo de regresión lineal simple intenta ajustar, con los datos de la muestra, la siguiente ecuación:

$$Y = a + b X$$

Donde “a” es el valor de la ordenada en el origen, esto es, el valor que adoptará Y cuando X valga cero; “b” es la pendiente de la recta y se interpreta como el cambio de Y por cada unidad de cambio de X.

En consecuencia, una vez estimados estos coeficientes, en la mayoría de las aplicaciones el valor de “a” no tiene una interpretación directa, mientras que el valor “b” sirve como un indicador del sentido de asociación entre ambas variables: un valor $b > 0$ indica una relación directa entre ellas, a mayor valor de la variable explicativa, X, el valor de la variable dependiente, Y, aumentará. Un valor $b < 0$ evidencia una relación de tipo inverso, mientras que $b = 0$ indica que no existe una relación lineal entre ambas variables.

Una vez ajustada la recta de regresión a la nube de observaciones, es importante disponer de una medida de la bondad del ajuste realizado y que permita decidir si el ajuste lineal es suficiente. Como medida de la bondad del ajuste se utiliza el coeficiente de determinación, que, al realizar una regresión lineal simple, coincide con el cuadrado del coeficiente de correlación lineal. El coeficiente de determinación se interpreta como el porcentaje de variación de la variable dependiente explicado por el modelo, se denota por R^2 y se verifica que $0 < R^2 < 1$, por lo que es usual expresar esta medida en tanto por ciento.

Antes de contrastar si existe o no una diferencia estadísticamente significativa entre las distribuciones de las dos variables consideradas, se comprueba si las poblaciones de las que proceden las muestras pueden suponerse que se distribuyen según una ley normal.

La importancia de la distribución normal se debe fundamentalmente a la frecuencia con la que distintas variables asociadas a fenómenos naturales y cotidianos siguen, aproximadamente, esta distribución. El uso de las más elementales técnicas estadísticas requiere la normalidad de los datos observados, aunque muchas de estas técnicas no son demasiado sensibles a desviaciones de la normal y, en general, esta hipótesis puede obviarse cuando se dispone de un número suficiente de datos. Este resultado se debe al Teorema Central del Límite que establece que bajo ciertas condiciones, como son la independencia de las observaciones y la suposición de que están idénticamente distribuidas, la suma de un gran número de variables aleatorias se distribuye aproximadamente como una normal (Abad et al., 2001).

De cualquier modo, resulta recomendable contrastar siempre si se puede asumir o no una distribución normal. Para ello existen medidas, gráficos de normalidad y contrastes de hipótesis que pueden ayudar a decidir, de un modo más riguroso, si la muestra sobre la que se realiza el estudio procede o no de una distribución normal.

En este trabajo se desarrollan dos procedimientos para determinar si las poblaciones de las que proceden las muestras pueden suponerse que se distribuyen según una ley normal.

1. En primer lugar se va a utilizar un método gráfico, este método se conoce como gráfico de normalidad, en el que se representan los pares $\{x_i; F(x_i)\}$ y $\{x_i; F_n(x_i)\}$ $i = 1, \dots, n$, donde $F_n(x_i)$ es la frecuencia relativa acumulada de la muestra, distribución empírica, y $F(x_i)$ es la distribución teórica, en este caso la distribución normal. Estas curvas se representan en unos ejes escalados de forma que los puntos $\{x_i; F(x_i)\}$ $i = 1, \dots, n$ se sitúan sobre la recta $Y = X$. Por tanto, si los puntos $\{x_i; F_n(x_i)\}$ $i = 1, \dots, n$ están próximos a esta recta, se aceptará la hipótesis de normalidad
2. En segundo lugar se utiliza un método Analítico, se denomina prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra, es una prueba de bondad de ajuste y sirve para contrastar la hipótesis nula de que la distribución de una variable se ajusta a una determinada

distribución teórica de probabilidad, en este caso la distribución normal. El contraste que se realiza es el siguiente:

H_0 : La distribución observada se ajusta a la distribución Normal

H_1 : La distribución observada no se ajusta a la distribución Normal

Compara la función de distribución observada de una variable con una distribución teórica determinada. El estadístico de prueba de este contraste se calcula a partir de la diferencia mayor, en valor absoluto, entre las funciones de distribución teórica y observada.

Una vez determinada la normalidad de las muestras, para comprobar si existe o no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las distribuciones de las dos variables consideradas, se llevan a cabo dos procedimientos:

1. Prueba T para dos muestras independientes, Con este procedimiento se pretende comprobar si las medias poblacionales de dos poblaciones normales e independientes son iguales o no, es decir, $H_0 : \mu_X = \mu_Y$, medias iguales, o lo que es lo mismo $H_0 : \mu_X - \mu_Y = 0$. Para contrastar esta hipótesis existen distintos estadísticos según las varianzas poblacionales sean iguales o no, lo que se determina a través de la prueba de Levene, cuyo estadístico sigue una distribución F-Snedecor.
2. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para dos muestras, esta prueba sirve para contrastar la hipótesis de que dos muestras proceden de la misma población, comparando las funciones de distribución de ambas muestras. Esta prueba es sensible a cualquier tipo de diferencia entre las dos distribuciones: tendencia central, simetría o variabilidad.

Para finalizar, se intenta determinar los valores de la variable UNE-EN, Y, a partir de los valores de la variable NLT, X, este proceso se realiza de dos formas diferentes:

1. Teniendo en cuenta el valor de R^2 , la ecuación del modelo lineal ajustado para describir la relación entre ambas variables y fijando el valor de la variable NLT, se puede obtener el valor que alcanza la variable UNE-EN.
2. Es importante conocer que, a partir de cualquier variable X que siga una distribución $N(\mu, \sigma^2)$, se puede obtener otra variable Z con una distribución normal tipificada, sin más que efectuar la transformación:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

Esta propiedad resulta especialmente interesante, ya que para una distribución $N(0,1)$ existen tablas publicadas a partir de las que se puede obtener de modo sencillo la probabilidad de observar un dato menor o igual a un cierto valor z. Por tanto,

Tipificando el valor de la variable NLT se puede determinar el valor de la variable UNE-EN que, tipificado, iguale el valor obtenido anteriormente para la variable NLT.

Para realizar el estudio estadístico sobre los resultados obtenidos se utiliza el programa SPSS.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados obtenidos al efectuar los ensayos de inmersión-compresión y sensibilidad al agua sobre el mismo tipo de mezcla, así como los ensayos en pista NLT-173 y UNE-EN1297-22.

Posteriormente, para cada par de ensayos, se desarrolla el estudio estadístico y se determina el valor que equipara la especificación exigida en ambos ensayos atendiendo al tipo de mezcla en estudio, a la orden circular 24/2008 del PG-3 relativa a normativa UNE-EN y al PG-3 2004 referente a la normativa NLT.

4.1. ENSAYO DE INMERSIÓN-COMPRESIÓN NLT-162 / ENSAYO DE SENSIBILIDAD AL AGUA UNE-EN 12697-12.

El PG-3 (2004) establece que, para el ensayo de inmersión-compresión y para la mezcla considerada en esta investigación, la pérdida de resistencia no rebasará el 25 %, por lo que no debe ser inferior a 75% el valor de resistencia conservada, mientras que en la Orden Circular 24/2008 (Ministerio de Fomento, 2008), el valor mínimo exigido para la relación de resistencia a tracción indirecta en el ensayo de sensibilidad al agua, es 85%.

Aunque no sigue una tendencia uniforme, puede observarse que el valor de sensibilidad al agua es siempre superior al obtenido mediante el ensayo de inmersión-compresión, véase figura 31.

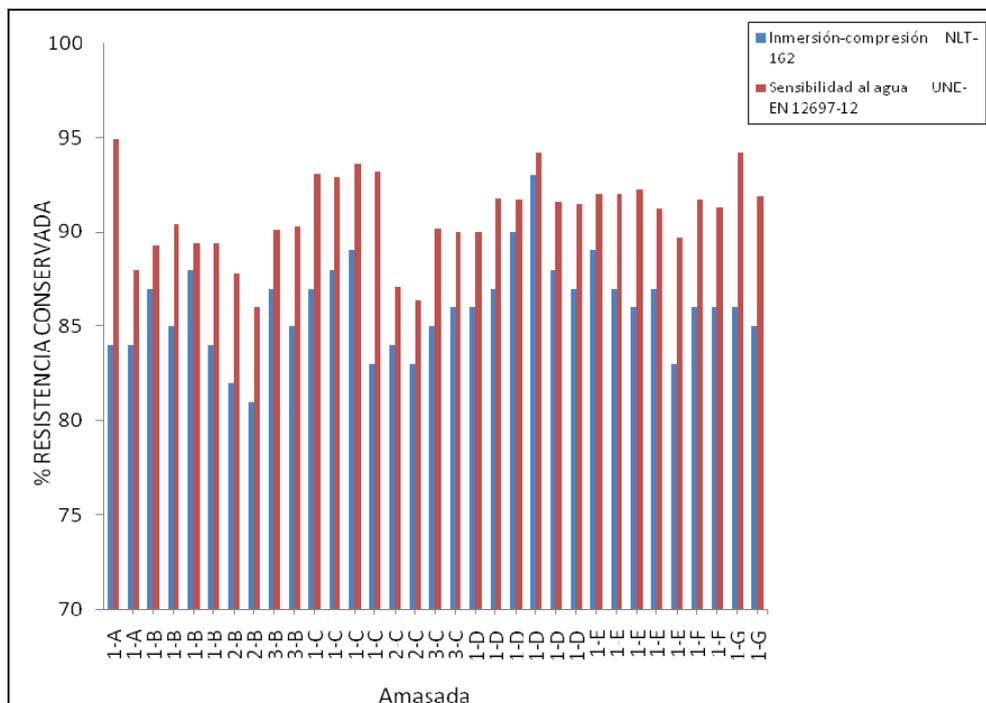


Figura 31. Representación resultados tabla 8

Nº Muestra	Inmersión-compresión NLT-162 (%) IRC	Sensibilidad al agua UNE-EN 12697-12 (%) ITSR
1-A	84	94,9
1-A	84	88,0
1-B	87	89,3
1-B	85	90,4
1-B	88	89,4
1-B	84	89,4
2-B	82	87,8
2-B	81	86,0
3-B	87	90,1
3-B	85	90,3
1-C	87	93,1
1-C	88	92,9
1-C	89	93,6
1-C	83	93,2
2-C	84	87,1
2-C	83	86,4
3-C	85	90,2
3-C	86	90,0
1-D	86	90,0
1-D	87	91,8
1-D	90	91,7
1-D	93	94,2
1-D	88	91,6
1-D	87	91,5
1-E	89	92,0
1-E	87	92,0
1-E	86	92,3
1-E	87	91,2
1-E	83	89,7
1-F	86	91,7
1-F	86	91,3
1-G	86	94,2
1-G	85	91,9

Tabla 8. Resultados NLT-162 / UNE-EN 12697-12

Puede comprobarse, véanse figuras 16 y 17, que las 33 muestras cumplen las prescripciones establecidas para ambos ensayos.

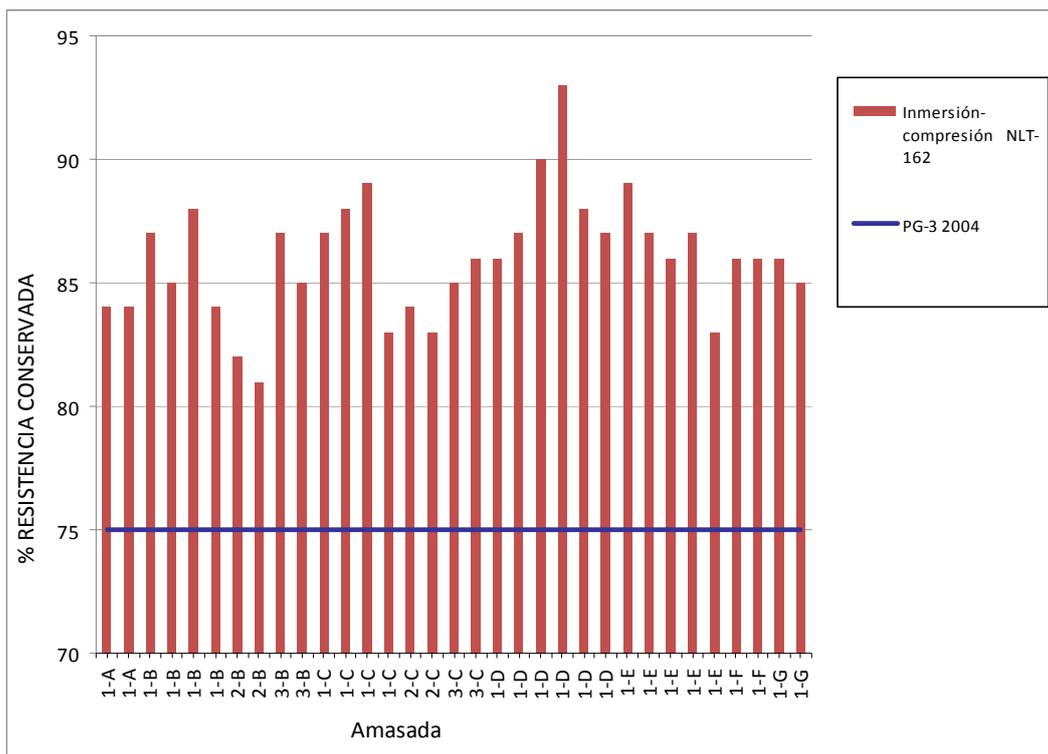


Figura 32. Representación resultados NLT-162, junto con prescripción PG-3 (2004)

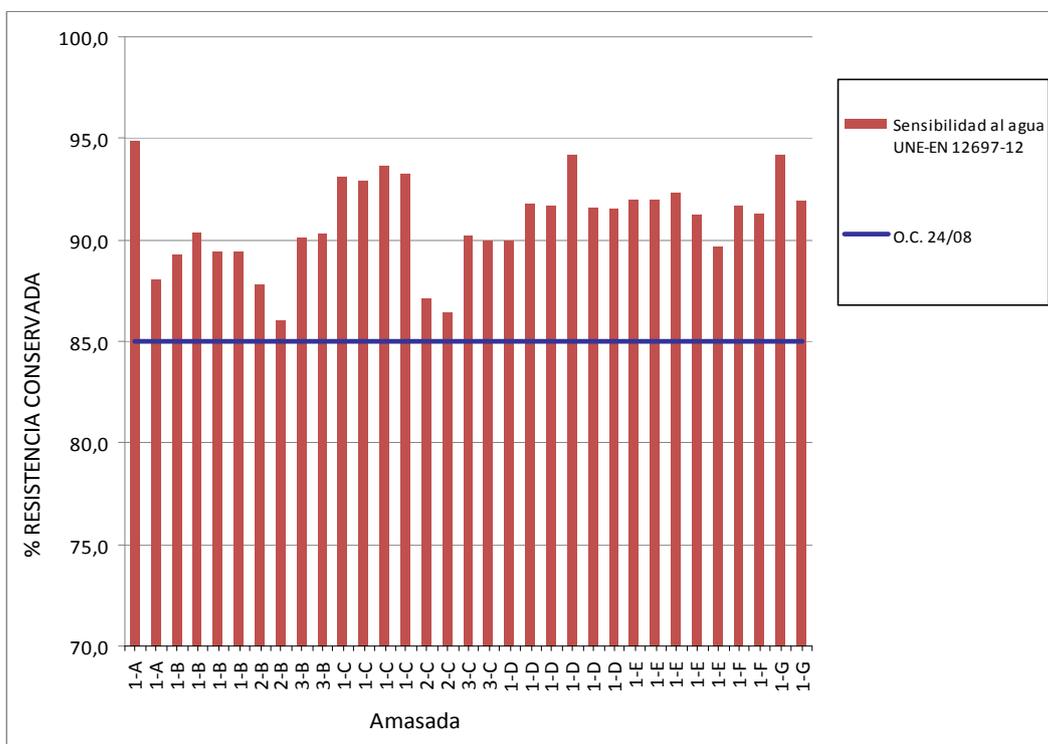


Figura 33. Representación resultados UNE-EN 12697-12, junto con prescripción OC. 24/2008

Realizando un Análisis de Regresión - Modelo Lineal $Y = a + b \times X$, donde la variable dependiente, variable Y, es el valor obtenido de ITSR, sensibilidad al agua UNE-EN 12697-12

(AENOR, 2009) y la variable independiente, variable X, es el valor de resistencia conservada obtenida mediante el ensayo de inmersión-compresión NLT-162 (CEDEX, 2000b), se obtienen los siguientes resultados:

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típ.	Beta		
1 (Constante)	46,029	11,468		4,014	,000
Inmersión-compresión NLT-162	,522	,133	,575	3,913	,000

a. Variable dependiente: Sensibilidad al agua UNE-EN 12697-12

Tabla 9. Análisis de regresión variable inmersión-compresión/sensibilidad al agua.

La ecuación del modelo lineal ajustado para describir la relación entre inmersión-compresión NLT-162 (CEDEX, 2000b) y sensibilidad al agua UNE-EN 12697-12 (AENOR, 2009) es:

$$Y = 46,029 + 0,522 \times X$$

ANOVA^b

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	51,688	1	51,688	15,311	,000 ^a
	Residual	104,654	31	3,376		
	Total	156,342	32			

a. Variables predictoras: (Constante), Inmersión-compresión NLT-162

b. Variable dependiente: Sensibilidad al agua UNE-EN 12697-12

Tabla 10. ANOVA variable inmersión-compresión/sensibilidad al agua.

Dado que el p-valor (Sig.) en la tabla ANOVA es 0,000, inferior a 0,05; existe relación estadísticamente significativa entre inmersión-compresión NLT-162 (CEDEX, 2000b) y sensibilidad al agua UNE-EN 12697-12 (AENOR, 2009) para un nivel de confianza del 95%.

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,575 ^a	,331	,309	1,83737

a.

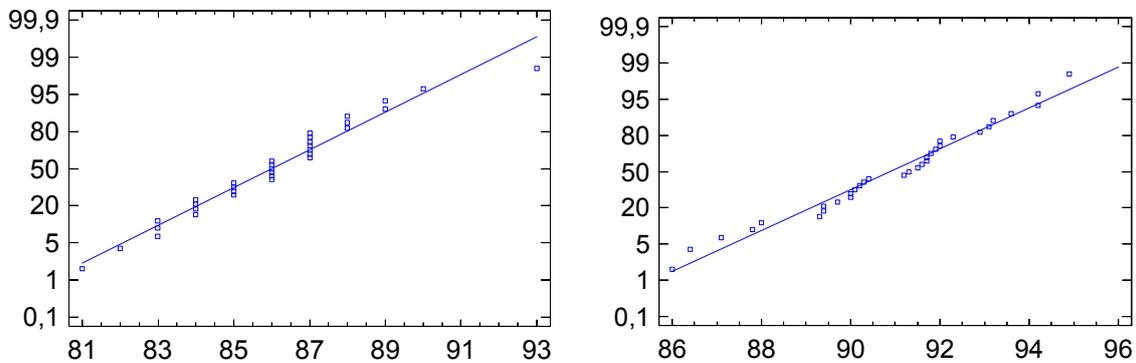
Variables predictoras: (Constante), Inmersión-compresión NLT-162

Tabla 11. Resumen del modelo variable inmersión-compresión/sensibilidad al agua.

El Valor de R² indica que el modelo explica un 33,1% de la variabilidad en la variable sensibilidad al agua UNE-EN 12697-12 (AENOR, 2009).

Como el R^2 toma un valor relativamente bajo, se continúa el estudio estadístico realizando dos pruebas para contrastar si las poblaciones de las que proceden las muestras se distribuyen según una ley normal:

1. En primer lugar se utiliza un método gráfico,



A. Inmersión-compresión NLT-162

B. Sensibilidad al agua UNE-EN 12697-12

Figura 34. Gráficos de normalidad para las variables inmersión-compresión y sensibilidad al agua

Puede comprobarse que, en ambos casos, los puntos pueden representarse aproximadamente por una línea recta, por tanto, puede suponerse que los datos de las dos muestras proceden de poblaciones que siguen distribuciones normales.

2. En segundo lugar, se utiliza un método no paramétrico para determinar si los datos pueden seguir una distribución normal como es la prueba de Kolmogorov-Smirnov.

		Inmersión-c ompresión NLT-162	Sensibilidad al agua UNE-EN 12697-12
N		33	33
Parámetros normales ^{a,b}	Media	86,0000	90,8848
	Desviación típica	2,43670	2,21036
Diferencias más extremas	Absoluta	,129	,102
	Positiva	,129	,065
	Negativa	-,106	-,102
Z de Kolmogorov-Smirnov		,739	,587
Sig. asintót. (bilateral)		,646	,881

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

Tabla 12. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra para las variables inmersión-compresión y sensibilidad al agua.

Atendiendo al p-valor o nivel de significación empírico de la prueba de Kolmogorov-Smirnov para ambas variables consideradas, 0,646 y 0,881 respectivamente, no se rechaza la hipótesis nula, H_0 , en ningún caso y por tanto, con estos datos muestrales, no existirían motivos para rechazar que dichas variables siguen ambas una distribución Normal.

Para comprobar si las variables consideradas siguen la misma distribución Normal, se realizan dos pruebas: La prueba T de igualdad de medias y el test de Kolmogorov-Smirnov para comparar las distribuciones de las dos muestras.

1. La prueba T de igualdad de medias:

Prueba de muestras independientes										
		Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias					95% Intervalo de confianza para la diferencia	
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia	Inferior	Superior
Agua	Se han asumido varianzas iguales	,020	,889	-8,530	64	,000	-4,88485	,57269	-6,02893	-3,74077
	No se han asumido varianzas iguales			-8,530	63,401	,000	-4,88485	,57269	-6,02914	-3,74056

Tabla 13. Prueba T de igualdad de medias para las variables inmersión-compresión y sensibilidad al agua.

Para determinar el intervalo de confianza de la diferencia entre las medias, hay que determinar la igualdad o desigualdad de las varianzas de las dos muestras a tratar. Atendiendo al p-valor, Sig., de la prueba de Levene para la igualdad de varianzas. Dado que el p-valor de esta prueba, 0,889, es mayor a 0,05 no existe diferencia estadísticamente significativa entre las dos varianzas para un nivel de confianza del 95%.

Una vez asumido la igualdad de varianzas es de particular interés el intervalo de confianza para la diferencia entre las medias, el cual se extiende desde -6,02893 hasta -3,74077. Dado que el intervalo no contiene el valor 0, se puede asegurar que existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las poblaciones de las que proceden las dos muestras para un nivel de confianza del 95%.

Por tanto las distribuciones de las dos variables a pesar de ser normales y tener la misma varianza no siguen la misma distribución, ya que la media no es la misma.

2. Se realiza el test de Kolmogorov-Smirnov para comparar las distribuciones de las dos muestras.

Estadísticos de contraste^a

		Agua
Diferencias más extremas	Absoluta	,788
	Positiva	,788
	Negativa	,000
Z de Kolmogorov-Smirnov		3,200
Sig. asintót. (bilateral)		,000

a. Variable de agrupación: tipo

Tabla 14. Test de Kolmogorov-Smirnov para las variables inmersión-compresión y sensibilidad al agua.

Este test se ha realizado calculando la distancia máxima entre las distribuciones acumuladas de las dos muestras. En este caso, la máxima distancia es 0,788.

Atendiendo al p-valor, Sig. asintót. (bilateral), obtenido y dado que es menor a 0,05, existe diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones para un nivel de confianza del 95%. Lo que confirma el resultado obtenido con la prueba T de igualdad de medias.

La determinación de los valores de la variable sensibilidad al agua UNE-EN 12697-12 (AENOR, 2009) a partir de los valores de la variable inmersión-compresión NLT-162 (CEDEX, 2000b) se puede realizar de 2 formas diferentes:

1. Ya que el valor de R² es 33,1% y teniendo en cuenta la ecuación del modelo lineal ajustado para describir la relación entre inmersión-compresión y sensibilidad al agua:

$$Y = 46,029 + 0,522 \times X$$

Supuesto que la variable inmersión-compresión, toma el valor x = 75, se tiene que el valor que alcanza la variable sensibilidad al agua es y = 85,1.

2. Tipificando las variables consideradas, inmersión-compresión y sensibilidad al agua UNE, y tipificando el valor 75 de la variable inmersión-compresión, se obtiene un resultado de -4,5143. Al determinar el valor de la variable sensibilidad al agua que al tipificar iguale ese resultado se obtiene una valor de 80,9. Utilizando el valor 80,9 % como valor mínimo exigido para el ensayo de sensibilidad al agua todas las muestras ensayadas mediante ese ensayo cumplirían esta prescripción.

4.2. PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO NLT-173 / ENSAYO DE RODADURA UNE-EN 12697-22

En las tablas 15 y 16 se recogen los resultados obtenidos mediante los ensayos NLT-173 y UNE-EN 12697-22 respectivamente. Puede comprobarse que el número de muestras utilizadas para estos ensayos es de 31, debido a que hubo que desechar dos de ellas por problemas en la compactación de las probetas.

Para realizar el estudio se han considerado las prescripciones más restrictivas del PG-3 tanto para el ensayo en pista NLT-173 (CEDEX, 2000c) como para el ensayo de rodadura UNE-EN 12697-22 (AENOR, 2008d) sin tener en cuenta la categoría de tráfico pesado y la zona térmica estival. Es decir, 12 $\mu\text{m}/\text{min}$ para el ensayo en pista y 0,07 $\text{mm}/10^3$ ciclos carga para el ensayo de rodadura.

NºMuestra	Velocidad deformación (105/120) ($\mu\text{m}/\text{min}$)	Def. final (mm)
1-A	6,7	3,33
1-A	4,2	1,93
1-B	5,2	2,34
1-B	8,4	3,40
1-B	5,8	2,29
1-B	4,6	2,23
3-B	6,7	3,34
3-B	6,5	3,06
1-C	6,7	2,99
1-C	6,9	3,04
1-C	8,0	3,27
1-C	7,3	4,29
2-C	5,6	2,76
2-C	6,1	3,09
3-C	7,9	3,18
3-C	5,8	2,03
1-D	4,1	2,54
1-D	4,2	1,93
1-D	5,4	3,16
1-D	10,2	4,08
1-D	5,7	3,38
1-D	6,2	2,59
1-E	8,2	2,48
1-E	8,0	2,91
1-E	9,0	3,41
1-E	9,3	3,37
1-E	9,0	3,73
1-F	7,2	3,29
1-F	7,5	3,44
1-G	8,6	4,21
1-G	7,6	3,52

Tabla 15. Resultados ensayo en pista NLT-173

Nº Muestra	Pendiente de deformación WTS_{AIRE} (mm/10 ³ ciclos carga)	Media RD (mm)
1-A	0,101	3,492
1-A	0,174	5,295
1-B	0,085	3,146
1-B	0,062	2,748
1-B	0,058	2,593
1-B	0,099	3,430
3-B	0,126	3,862
3-B	0,073	3,111
1-C	0,104	3,620
1-C	0,078	2,939
1-C	0,088	2,065
1-C	0,084	3,699
2-C	0,075	2,677
2-C	0,075	3,491
3-C	0,088	3,059
3-C	0,107	3,329
1-D	0,072	2,514
1-D	0,095	3,698
1-D	0,097	3,815
1-D	0,094	3,840
1-D	0,067	3,227
1-D	0,069	3,006
1-E	0,130	4,343
1-E	0,130	4,192
1-E	0,130	4,197
1-E	0,179	4,794
1-E	0,153	4,483
1-F	0,100	3,634
1-F	0,113	4,493
1-G	0,072	2,702
1-G	0,076	3,095

Tabla 16. Resultados ensayo de rodadura UNE-EN 12697-22

Las figuras 19 y 20 representan los resultados de cada uno de los ensayos junto con sus prescripciones.

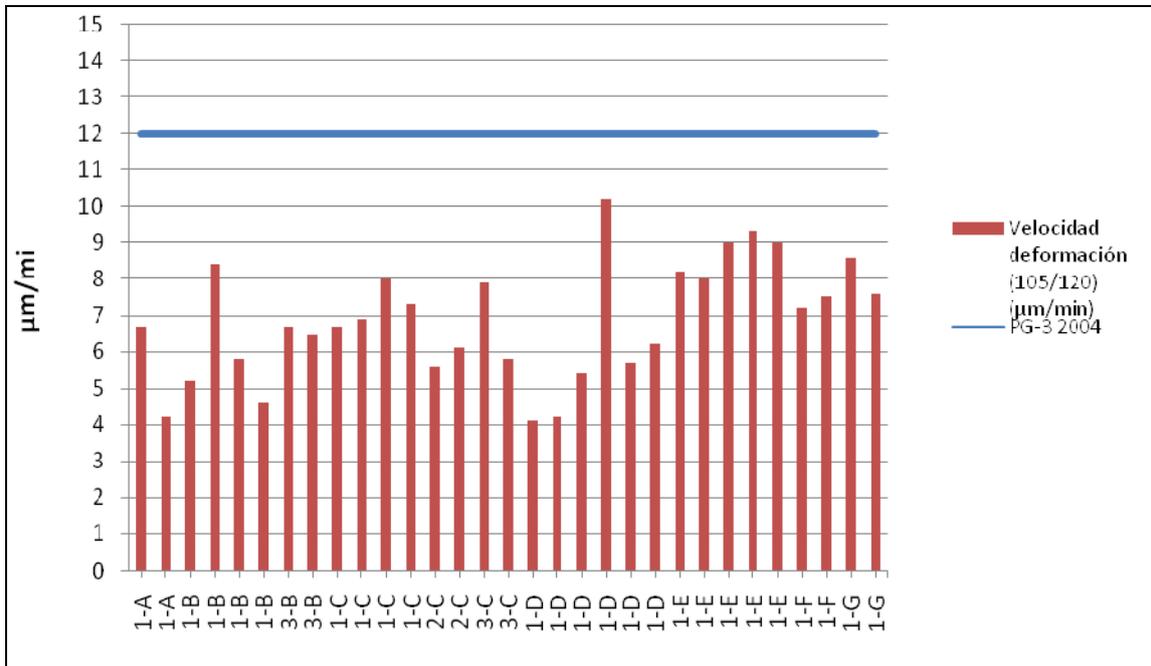


Figura 35. Representación resultados tabla 15, junto con prescripción PG-3 (2004)

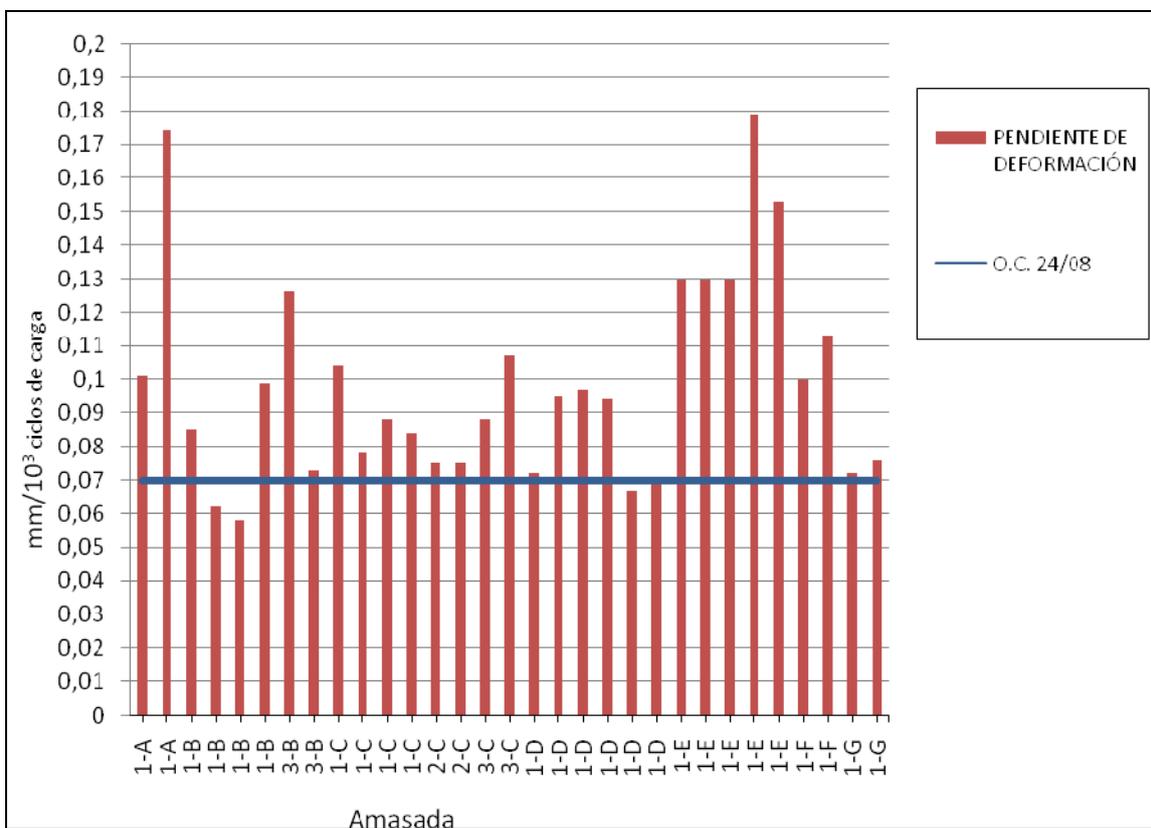


Figura 36. Representación resultados tabla 16, junto con prescripción O.C.24/2008

Según el PG-3 (2004), en el ensayo en pista todas las muestras ensayadas, cumplen la prescripción. En cambio, sólo 4 de ellas cumplen la prescripción de O.C.24/2008 (Ministerio de Fomento, 2008) relativa al ensayo de rodadura. Esto indica que según la normativa europea la nueva especificación exigida es más restrictiva que la antigua.

Realizando un Análisis de Regresión - Modelo Lineal $Y = a + b \times X$, considerando la variable dependiente, Y, ensayo de rodadura UNE-EN 12697-22 (AENOR, 2008d) y la variable independiente, X, ensayo en pista NLT-173 (CEDEX, 2000c) se determinan los siguientes resultados:

Coeficientes^a

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	(Constante)	,067	,025		2,728	,011
	Ensayo en Pista NLT-173	,005	,003	,236	1,308	,201

a. Variable dependiente: Ensayo de Rodadura UNE-EN 12697-22

Tabla 17. Análisis de regresión variable ensayo en pista/ensayo rodadura.

La ecuación del modelo lineal ajustado para describir la relación entre ensayo en pista NLT-173 (CEDEX, 2000c) y ensayo de rodadura UNE-EN 12697-22 (AENOR, 2008d) es:

$$Y = 0,067 + 0,005 \times X$$

ANOVA^b

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	,002	1	,002	1,710	,201 ^a
	Residual	,027	29	,001		
	Total	,029	30			

a. Variables predictoras: (Constante), Ensayo en Pista NLT-173

b. Variable dependiente: Ensayo de Rodadura UNE-EN 12697-22

Tabla 18. Análisis de regresión variable ensayo en pista/ensayo rodadura.

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA, 0,201, es mayor a 0,05; no existe relación estadísticamente significativa entre ensayo en pista NLT-173 (CEDEX, 2000c) y ensayo rodadura UNE-EN 12697-22 (AENOR, 2008d) para un nivel de confianza del 95%.

Resumen del modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,236 ^a	,056	,023	,03061

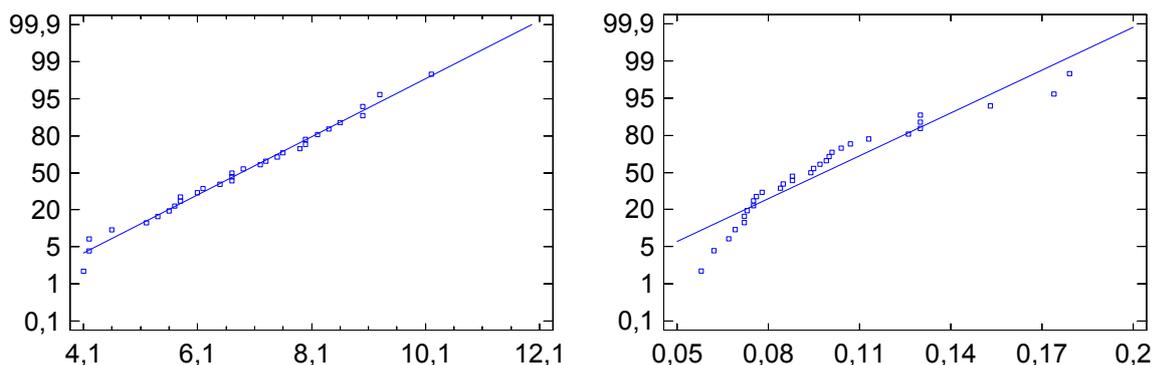
a. Variables predictoras: (Constante), Ensayo en Pista NLT-173

Tabla 19. Resumen del modelo variable ensayo en pista/ensayo rodadura.

El Valor de R^2 indica que el modelo explica un 5,6% de la variabilidad en la variable ensayo de rodadura UNE-EN 12697-22 (AENOR, 2008d).

Como no existe relación estadísticamente significativa entre ambos ensayos y el R^2 toma un valor muy bajo, al igual que en el apartado anterior, se realizan dos pruebas para contrastar si las poblaciones de las que proceden las muestras se distribuyen según una ley normal:

1. En primer lugar se utiliza un método gráfico,



A. Ensayo en Pista NLT-173

B. Ensayo de Rodadura UNE-EN 12697-22

Figura 37. Gráficos de normalidad para las variables ensayo en pista y ensayo rodadura

Se comprueba que, en ambos casos, los puntos pueden representarse aproximadamente por una línea recta, por tanto, puede suponerse que los datos de las dos muestras proceden de poblaciones que siguen distribuciones normales.

2. En segundo lugar, la prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		Ensayo de Rodadura UNE-EN 12697-22	Ensayo en Pista NLT-173
N		31	31
Parámetros normales ^{a,b}	Media	,0985	6,8581
	Desviación típica	,03097	1,59766
Diferencias más extremas	Absoluta	,145	,069
	Positiva	,145	,069
	Negativa	-,095	-,065
Z de Kolmogorov-Smirnov		,810	,382
Sig. asintót. (bilateral)		,528	,999

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

Tabla 20. Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra para las variables ensayo en pista y ensayo rodadura.

Atendiendo al p-valor o nivel de significación empírico de la prueba de Kolmogorov-Smirnov para ambas variables consideradas, 0,528 y 0,999 respectivamente, no se rechaza la hipótesis nula, H_0 , en ningún caso y por tanto, con estos datos muestrales, no existirían motivos para rechazar que dichas variables siguen ambas una distribución Normal.

Para comprobar si las variables consideradas, siguen la misma distribución Normal, se realizan dos pruebas:

1. La prueba T de igualdad de medias:

Prueba de muestras independientes										
		Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error ttp. de la diferencia	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
Deformacion	Se han asumido varianzas iguales	64,215	,000	23,552	60	,000	6,75955	,28700	6,18546	7,33364
	No se han asumido varianzas iguales			23,552	30,023	,000	6,75955	,28700	6,17343	7,34567

Tabla 21. Prueba T de igualdad de medias para las variables ensayo en pista y ensayo rodadura.

Para determinar el intervalo de confianza de la diferencia entre las medias, hay que determinar la igualdad o desigualdad de las varianzas de las dos muestras a tratar. Atendiendo al p-valor, Sig., de la prueba de Levene para la igualdad de varianzas y dado que el p-valor es menor a 0,05 existe diferencia estadísticamente significativa entre las dos varianzas para un nivel de confianza del 95%.

Una vez asumido la desigualdad de varianzas es de particular interés el intervalo de confianza para la diferencia entre las medias, el cual se extiende desde 6,17343 hasta 7,34567. Dado que el intervalo no contiene el valor 0, existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las poblaciones de las que proceden las dos muestras para un nivel de confianza del 95%.

Por tanto las distribuciones de las dos variables a pesar de ser normales no tienen la misma distribución, ya que tanto las medias como las varianzas no coinciden.

2. Se realiza el test de Kolmogorov-Smirnov para comparar las distribuciones de las dos muestras.

Estadísticos de contraste^a

		Deformacion
Diferencias más extremas	Absoluta	1,000
	Positiva	,000
	Negativa	-1,000
Z de Kolmogorov-Smirnov		3,937
Sig. asintót. (bilateral)		,000

a. Variable de agrupación: tipo

Tabla 22. Test de Kolmogorov-Smirnov para las variables ensayo en pista y ensayo rodadura.

Este test se ha realizado calculando la distancia máxima entre las distribuciones acumuladas de las dos muestras. En este caso, la máxima distancia es 1,000.

Atendiendo al p-valor obtenido y dado que es menor a 0,05, existe diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones para un nivel de confianza del 95%. Lo que confirma el resultado obtenido con la prueba T de igualdad de medias.

La determinación de los valores de la variable ensayo de rodadura UNE-EN 12697-22 (AENOR, 2008d) a partir de los valores de la variable ensayo en pista NLT-173 (CEDEX, 2000c) se puede realizar de 2 formas diferentes:

1. Ya que el valor de R^2 es 5,6% y teniendo en cuenta la ecuación del modelo lineal ajustado para describir la relación entre la relación entre ensayo en pista y ensayo de rodadura:

$$Y = 0,067 + 0,005 \times X$$

Supuesto que la variable ensayo en pista, toma el valor $x = 12$, se tiene que el valor que alcanza la variable ensayo de rodadura es $y = 0,12$.

2. Tipificando las variables consideradas, Ensayo en Pista y Ensayo de Rodadura, y tipificando el valor $12 \mu\text{m}/\text{min}$ de la variable Ensayo en Pista, se obtiene un resultado de 3,2184. Al determinar el valor de la variable Ensayo de Rodadura que al tipificar iguale ese resultado se obtiene un valor de $0,19 \text{ mm}/10^3 \text{ ciclos carga}$. En la figura 38 puede observarse que todos los resultados de las muestras ensayadas mediante el ensayo de rodadura quedan por debajo de este valor, al igual que todos los resultados de las muestras ensayadas mediante el ensayo en pista cumplen la prescripción del PG-3 (2004).

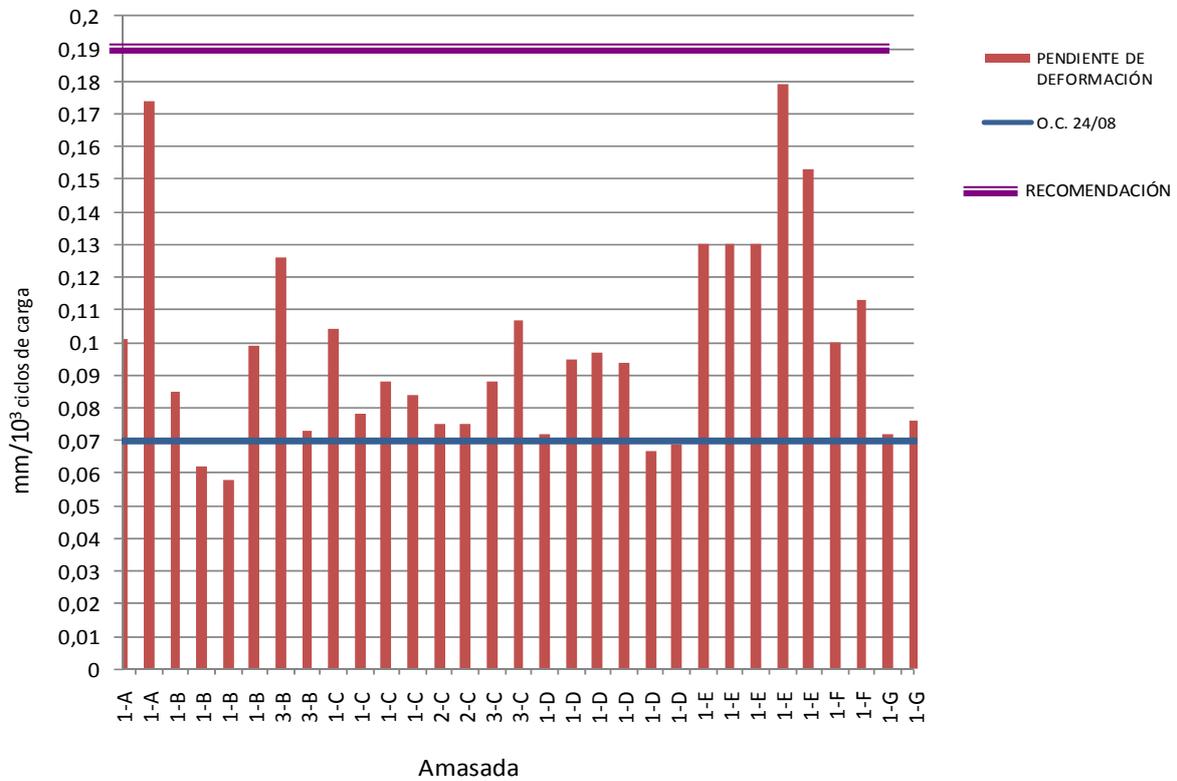


Figura 38. Representación resultados tabla 16, junto con prescripción O.C.24/2008 y el valor recomendado en este trabajo



5. CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

Son varios los deterioros que se pueden producir en el firme, dentro de ellos están los producidos por el efecto del agua y las deformaciones plásticas permanentes (roderas). Estos deterioros pueden ser evaluados por distintos ensayos desarrollados bajo diferentes normativas.

Con la entrada en vigor del Mercado CE, para la libre circulación de productos de construcción en el mercado interior de la Unión Europea, se agrupan los diferentes tipos de mezclas bituminosas que se desarrollaban en cada uno de los estados miembros y que disponían de características y normalización individuales. España debe adaptarse a estas nuevas normas.

La experiencia española en el diseño, control y comportamiento posterior en obra de las mezclas bituminosas ha tenido como referencia las normas NLT, elaboradas por el Laboratorio de Transportes y Mecánica de Suelos del Centro de Estudios y Experimentación del Ministerio de Obras Públicas (CEDEX), y posteriormente las, en la fabricación de mezclas bituminosas, las normas UNE-EN, elaboradas por el Comité Europeo de Normalización (CEN). La entrada en vigor de esta nueva normativa europea ha supuesto en algunos casos ligeras modificaciones respecto a las normas NLT pero otras de ellas implican la sustitución de ensayos ampliamente utilizados en España por otros nuevos no empleados hasta el momento.

Debido a los cambios producidos en los ensayos de caracterización de las mezclas bituminosas respecto a los que se venían empleando en España, se revisan los artículos 542 y 543 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), referente a mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso, mezclas drenantes y discontinuas.

Los estudios desarrollados en esta tesis doctoral se dividen en dos partes:

En la primera parte se analiza el efecto del agua sobre las mezclas bituminosas en caliente junto con los ensayos que se utilizan para cuantificar los daños producidos por el agua. En la segunda se estudian las deformaciones plásticas junto con los métodos de ensayo que se utilizan para su evaluación

En cuanto al *efecto del agua sobre las mezclas bituminosas en caliente*, se realiza un estudio comparativo de los ensayos utilizados en España, antes y después de la entrada en vigor del Mercado CE con el fin de comprobar la equivalencia entre los límites de especificación asignados a cada uno de los ensayos.

Son varios los factores que influyen en los daños producidos por el agua en una mezcla bituminosa en caliente y que tienen un impacto económico significativo en términos de

mantenimiento y rehabilitación. La sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas dependerá de los efectos combinados de las propiedades del material utilizado, los parámetros de diseño y construcción de la mezcla, el nivel de tráfico y los factores ambientales.

Cuantificar los daños producidos por el agua en mezclas bituminosas es una tarea complicada y tema de investigación en todo el mundo. En este trabajo de investigación se determina la susceptibilidad al agua mediante el ensayo inmersión –compresión (NLT-162) y el ensayo de sensibilidad al agua (UNE-EN 12697-12) sobre un tipo de mezcla bituminosa en caliente denominada AC16 Surf 35/50 S. Como ya se ha comentado en este trabajo de investigación, ambos ensayos tienen el mismo objetivo pero se diferencian en el tamaño y forma de compactación de las probetas (carga estática/compactación por impactos), su acondicionamiento en húmedo (24 horas a 60 °C/72 horas a 40 °C saturación mediante vacío), temperatura de ensayo (25°C /15°C), el tipo de rotura (compresión simple/tracción indirecta), los resultados de ambos ensayos se expresan como porcentaje entre el valor del grupo de probetas acondicionadas en húmedo, entre el de probetas acondicionadas en seco.

Para el tipo de mezcla utilizado en esta investigación el valor especificado para aceptar que la mezcla bituminosa es apta para su uso es de 75% en el caso del ensayo de inmersión-compresión y 85% en el ensayo de sensibilidad al agua.

Una vez analizados los resultados obtenidos de la aplicación de los dos métodos de ensayo se concluye que:

- Los valores de la relación de resistencia a la tracción indirecta entre probetas húmedas y secas en el ensayo europeo son siempre superiores a los valores de resistencia conservada obtenidos por el ensayo de Inmersión-Compresión, según normativa NLT.
- Como se ha reflejado en el análisis estadístico, existe relación estadísticamente significativa entre Inmersión-compresión NLT-162 y Sensibilidad al agua UNE-EN 12697-12 para un nivel de confianza del 95%, ambas muestras presentan indicios de normalidad, pero la prueba de comparación de parámetros determina que, aunque pueden suponerse iguales las varianzas, las medias de ambas son distintas, por tanto, ambas muestras proceden de dos poblaciones con distribución normal de igual varianza aunque de distinta media.
- Cabe resaltar que el coeficiente de determinación es bajo, por lo que el poder de predicción del modelo lineal queda en entredicho. Mediante esta predicción, se obtiene un valor de $y=85,1\%$ para el ensayo de sensibilidad al agua UNE-EN 12697-12 partiendo de un valor $x=75\%$ para inmersión-compresión NLT-162.
- Mediante la tipificación de las variables, se establece la cota de la normativa UNE-EN equiparable a la normativa NLT, obteniendo un valor de $y=80,9\%$ para el ensayo de sensibilidad al agua partiendo del mismo valor, $x=75\%$, para inmersión-compresión.

Todos los resultados de las muestras ensayadas mediante el Ensayo de Sensibilidad al agua superan el valor 80,9 %, es decir, todas las muestras cumplirían esa prescripción para el Ensayo de Sensibilidad al agua. De la misma forma que todos los resultados de las muestras ensayadas mediante el ensayo de inmersión-compresión cumplen la prescripción del PG-3 (2004).

Atendiendo a este valor, también se corrobora el hecho de que los valores obtenidos para la mezcla considerada con el ensayo de sensibilidad al agua son mayores que los obtenidos con el ensayo de inmersión-compresión.

En una segunda parte se estudian las *deformaciones plásticas* junto con los métodos de ensayo que se utilizan para su evaluación. Se realiza el estudio de los ensayos utilizados en España antes y después de la entrada en vigor del Mercado CE, y se comprueba que no existe equivalencia entre los límites de especificación fijados para cada uno de los métodos de ensayo considerados.

Son varios los factores que afectan a la resistencia de la mezcla bituminosa a la formación de roderas. Con objeto de producir mezclas bituminosas con resistencia a estas deformaciones, es necesario conocer los factores que influyen. Entre estos factores podemos destacar la granulometría, forma y textura de los áridos, polvo mineral, ligante, contenido de huecos, así como el tráfico y las condiciones ambientales.

Son muchos los ensayos de laboratorio que tienen la finalidad de evaluar las deformaciones plásticas que se producen en el firme, entre ellos los más utilizados son los denominados ensayos de simulación, debido a que simulan lo que sucede en un firme cuando esta sometido a cargas de tráfico.

En España hasta la entrada en vigor del Mercado CE, el ensayo utilizado para tal fin es el denominado Ensayo en pista según NLT-173, con el cambio de normativa, el ensayo que actualmente se utiliza para determinar las deformaciones plásticas es el ensayo de rodadura según UNE-EN 12697-22. Entre las diferencias que existen entre ambos ensayos podemos destacar: compactación de las probetas; aunque el equipo de ensayo es el mismo en ambos, cambia la frecuencia de movimiento, la carga aplicada a la rueda; la duración del ensayo e incluso las unidades en las que se expresan los resultados. Este cambio en la normativa conlleva el cambio en el valor límite especificado para el nuevo ensayo.

En este trabajo de investigación se aplican estos dos métodos de ensayo a un mismo tipo de mezcla bituminosa en caliente, y se estudia la correspondencia entre los valores límite exigidos para aceptar o rechazar la mezcla respecto a su comportamiento frente a la formación de roderas. En el caso del ensayo en pista este valor es de $12\mu\text{m}/\text{min}$ y para el ensayo de rodadura, $0,07\text{ mm}/10^3$ ciclos de carga. Obteniendo que:

- Se observa que en el Ensayo en Pista NLT-173 todas las muestras ensayadas cumplen con la prescripción exigida, mientras que en el Ensayo de Rodadura UNE-EN con las nuevas

- Tras analizar los resultados se concluye que no existe relación estadísticamente significativa entre el Ensayo en Pista NLT-173 y el Ensayo de Rodadura UNE-EN 12697-22 para un nivel de confianza del 95%.
- Ambas muestras presentan indicios de normalidad, pero la prueba de comparación de parámetros determina que no se pueden suponer iguales ni las varianzas ni las medias, por tanto, ambas muestras proceden de dos poblaciones normales de parámetros distintos.
- El valor del coeficiente de determinación es bastante bajo, por lo que, para establecer la cota de la normativa UNE-EN equiparable a la normativa NLT se recurre a la tipificación de las variables. De esta forma, para un valor $x=12 \mu\text{m}/\text{min}$ de la variable Ensayo en Pista NLT-173, se obtiene un resultado de la variable Ensayo de Rodadura $y= 0,19 \text{ mm}/10^3$ ciclos carga.

Todos los resultados de las muestras ensayadas mediante el Ensayo de Rodadura quedan por debajo de 0,19. Por tanto el valor 0,19 usado como valor máximo en las prescripciones correspondientes al Ensayo de Rodadura, para el tipo de mezcla estudiado, ofrece un resultado análogo a la prescripción del PG-3 (2004) en el Ensayo en Pista. Hecho que, como ya se ha puesto de manifiesto anteriormente, no ocurre con el actual valor recogido en la OC del 24/2008.



6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACION

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:

- Estudio de los métodos de ensayo NLT/UNE-EN para valorar el comportamiento mecánico de otro tipo de mezclas utilizadas en distintas capas del paquete de firme, con distinta granulometría así como tipo de ligante utilizado, con objeto de contrastar si los resultados de este estudio son extrapolables.
- Estudio de nuevos métodos de ensayo para cuantificar los daños producidos por el agua que proporcionen conocimientos sobre el comportamiento del material bajo carga y en presencia de agua.
- Estudio de nuevos métodos de ensayo, como ensayos fundamentales, para evaluar el potencial de una mezcla bituminosa en caliente a sufrir deformaciones plásticas permanentes.
- Estudio comparativo entre otros tipos de ensayos bajo ambas normativas.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, F., Huete, M.D., Vargas, M. (2001). *Estadística para las Ciencias Sociales y Laborales*. Proyecto Sur de Ediciones S.L.
- Abo-Qudais, S. (2007). "The effects of damage evaluation techniques on the prediction of environmental damage in asphalt mixtures". *Building and Environment*, 42 (1), pp. 288-296.
- Abo-Qudais, S., Al-Shweily, H. (2007). "Effect of aggregate properties on asphalt mixture stripping and creep behavior". *Construction and Building Materials*, 21 (9), pp. 1886-1898.
- Airey, G.D., Choi, Y.K. (2002). "State of the Art Report on Moisture Sensitivity Test Methods for Bituminous Pavement Materials". *International Journal of Road Materials and Pavement Design* 3(4), pp. 355-372.
- Airey, G.D., Collop, A.C., Zoorob, S.E., Elliott, R.C. (2008). "The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage". *Construction and Building Materials*, 22 (9), pp.2015-2024.
- Aksoy, A., Şamlioglu, K., Tayfur, S., Özen, H (2005). "Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixtures". *Construction and Building Materials* 19 (1), pp. 11-18.
- American Association of State Highways and Transportation Officials, AASHTO (2000). AASHTO T283-99: Resistance of compacted bituminous mixtures to moisture induced damage.
- American Society for Testing and Materials, ASTM (1985). D1664-80: Standard Test Method for Effect of water on compressive strength of compacted bituminous mixtures.
- American Society for Testing and Materials, ASTM (2005). D3625-96: Standard Practice for Effect of Water on Bituminous. Coated Aggregate Using Boiling Water.

American Society for Testing and Materials, ASTM (2007). D-1075: Standard Test Method for Effect of water on compressive strength of compacted bituminous mixtures.

American Society for Testing and Materials, ASTM (2009). D-4867: Standard Test Method for Effect of moisture on asphalt concrete paving mixtures.

Arambula, E. (2007). "Influence of Fundamental Material Properties and Air Void structure on Moisture Damage of Asphalt Mixes". *PhD Dissertation*, Texas A&M University.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2003a) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 8: Determinación del contenido de huecos en las probetas bituminosas.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2003b) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 29: Determinación de las dimensiones de las probetas bituminosas.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2004a) UNE-EN 13043/AC. Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2004b) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 23. Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2006a) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 18: Ensayo de escurrimiento de ligante.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2006b) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 25: Ensayo de compresión cíclico.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2007a) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 6: Determinación de la densidad aparente de las probetas por el método hidrostático.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2007b) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 11: Determinación de la afinidad entre áridos y betún.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2007c) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 17: Pérdida de partículas de una probeta de mezcla bituminosa drenante.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2007d) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 30: Preparación de la muestra mediante compactador de impactos.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2007e) 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 (2007f) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 33: Elaboración de probetas con compactador de placa.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2007g) UNE-EN 13108 Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 20: Ensayos de Tipo.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2008a) Serie de Normas UNE-EN 13108. Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 1: Hormigón bituminoso.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2008b) Serie de Normas UNE-EN 13108. Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 2: Mezclas bituminosas para capas delgadas.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2008c) Serie de Normas UNE-EN 13108. Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 7: Mezclas bituminosas para capas drenantes.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2008d) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 22: Ensayo de rodadura.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2008e) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 31: reparación de la muestra mediante compactador giratorio.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2009) 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.

Asphalt institute. Cita electrónica, página web:

<http://www.asphaltinstitute.org> , acceso: 03/05/2012

Asphalt Institute (2003). "Construction of hot mix asphalt pavements". Manual Series Nº 22 (MS-22). Second Edition.

Asphalt Institute (2007). "Moisture Sensitivity. Best Practices to Minimize Moisture sensitivity in Asphalt Mixtures". Manual Series Nº24 (MS-24). First Edition.

Bagampadde, U., Isacsson U., Kiggundu, B.M. (2004). "Classical and contemporary aspects of stripping in bituminous mixtures". *Road Materials and Pavement Design*, 5 (1), pp. 7-45.

- Bagampadde, U., Isacson, U., Kiggundu, B.M.(2005). "Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures". *International Journal of Pavement Engineering* 6 (4), pp. 229-239.
- Banerjee, A., De Fortier Smit, A., Prozzi, J.A (2012). "Influence of operational tolerances on HMA performance". *Construction and Building Materials*, 27 (1), pp. 15-23.
- Bennert, T., Cooley Jr., L.A., Ericson, C., Zavery, Z. (2011). "Coarse Aggregate Angularity and its relationship to permanent deformation of gravel-aggregate Hot mix asphalt in New York State". *Transportation Research Record* (2207), pp. 25-33.
- Bhasin, A. (2006). Development of methods to quantify bitumen-aggregate adhesion and loss of adhesion due to water. *PhD Dissertation*, Texas A&M University.
- Blab, R., Kappl, K., Lackner, R., Aigner L. (2006). "Permanent deformation of bituminous bound materials in flexible pavements: Evaluation of Test Methods and Prediction Models". *Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure* (SAMARIS.) Report Number: SAM-05-D28.
- Boadu, C. (2005). "Evaluation of rut resistance of Superpavetm fine-graded and coarse-graded mixtures coarse-graded mixtures". *PhD Dissertation*, University of Florida.
- Breakah, T.M., Bausano, J.P., Williams, R.C. (2009). "Integration of moisture sensitivity testing with gyratory mix design and mechanistic-empirical pavement design". *Journal of Transportation Engineering* 135 (11), pp. 852-857.
- Caro, S., Masad, E., Bhasin, A., Little, D.N. (2008). "Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: Mechanisms". *International Journal of Pavement Engineering* 9 (2), pp. 81-98.
- CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento (1973), Normas NLT de ensayo de carreteras. Norma NLT-160/73. Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas de árido fino empleando el aparato Hubbard Field. 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-168/90. Densidad y huecos en mezclas bituminosas compactadas. Madrid.
- CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento (1992), Normas NLT de ensayo de carreteras. Norma NLT-166/92. Adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos en presencia de agua. Madrid.
- CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento (1998), Normas NLT de ensayo de carreteras. NLT-161/98 Resistencia a compresión simple de mezclas bituminosas Madrid.
- CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento (2000a), Normas NLT de ensayo de carreteras. Norma NLT-159/00. Resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall. Madrid.
- CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento (2000b), 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 (2000c), Normas NLT de ensayo de carreteras. Norma NLT-173/00. Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio. Madrid.
- CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento (2000d), Normas NLT de ensayo de carreteras. Norma NLT-352/00. Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste Madrid.

- Chatti, K., Kim, H.B., Yun, K.K., Mahoney, J.P., Monismith, C.L. (1996). "Field investigation into effects of vehicle speed and tire pressure on asphalt concrete pavement strains". *Transportation Research Record* (1539), pp. 66-71.
- Chen, J.S., Wong, S.Y., Lin, K.Y. (2005). "Quantification of movements of flat and elongated particles in hot mix asphalt subject to wheel load test". *Materials and Structures*, 38 (277), PP. 395-402.
- Chen, X., Huang, B (2008). "Evaluation of moisture damage in hot mix asphalt using simple performance and superpave indirect tensile tests". *Construction and Building Materials* 22 (9), pp. 1950-1962.
- Cheng, D., Little, D.N., Lytton, R.L., Holste, J.C., Davis, R., Brown, S., Hobson, K., Dunning, M., McDaniel, B., Newman, K. (2002). "Use of surface free energy properties of the asphalt-aggregate system to predict moisture damage potential". *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions 71*, pp. 59-88. Colorado (USA).
- Choubane, B., Gokhale, S., Sholar, G., Moseley, H (2006). "Evaluation of Coarse- and Fine-Graded superpave mixtures under accelerated pavement testing". *Transportation Research Record* (1974), pp. 120-127.
- Choubane, B., Page, G.C., Musselman, J.A. (2000). "Suitability of Asphalt Pavement Analyzer for Predicting Pavement Rutting". *Transportation Research Record* (1723), pp. 107-115.
- Chowdhury, A., Button, J. (2002). "Evaluation of Superpave Shear Test Protocols". *Report Number: FHWA/TX-02/1819-1*. Texas Transportation Institute.
- Cooley Jr., L.A., Kandhal, P.S., Buchaman, M.S., Free, F., Epps, A. (2000). "Loaded Wheel Tester in the United State: State of the practice". *Transportation Research E-Circular* Number: E-C016, ISSN 0097-8515.

- Cooley, L. A., Zhang, J., Kandhal, P.S., Hand, A. J., Martin, A. E. (2002). "Significance of Restricted Zone in Superpave Aggregate Gradation Specification". *Transportation Research Circular* Number E-C043.
- Copeland A.R. (2007). "Influence of moisture on bond strength of asphalt-aggregate systems". *PhD Dissertation*, University of Vanderbilt.
- Curtis, C.W., Ensley, K., Epps, J. (1993). "Fundamental Properties of Asphalt-Aggregate Interactions Including Adhesion and Absorption". *Report SHRP Number: A-341*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C. (USA).
- Doh, Y.S., Yun, K.K., Amirkhanian, S.N., Kim, K.W. (2007). "Framework for developing a static strength test for measuring deformation resistance of asphalt concrete mixtures". *Construction and Building Materials*, 21 (12), pp.2047-2058.
- El-Basyouny, M.M., Mamlouk, M.S (1999). "Effect of aggregate gradation on rutting potential of Superpave mixes". *78 th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C. (USA).
- Fonseca, C.H. (2000). "Estudio de deformaciones plásticas permanentes (rutting) en mezclas asfálticas elaboradas con materiales de la zona noreste de México mediante la máquina de pista (wheel tracking)". *Ingeniería de la Construcción*, Vol. 15, nº2.
- Fontes, L.P.T.L., Trichês, G., Pais, J.C., Pereira, P.A.A. (2010). "Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures". *Construction and Building Materials*, 24 (7), pp. 1193-1200.
- Gabbar, R. (2002). "Permanent Deformation Properties of asphalt concret mixtures". *PhD Dissertation*, Norwegian University of Science and Technology.
- Gabet, T., Di Benedetto, H., Perraton, D., De Visscher, J., Gallet, T., Bankowski, W., Orland, F., Grenfell, J., Bodin, D., Sauzéat, C. (2011). "French wheel tracking round robin test on a

- polymer modified bitumen mixture. RILEM TC 206-ATB, TG3: Mechanical testing of mixtures". *Construction and Building Materials*, 44 (6), pp.1031-1046.
- Garnica, P., Delgado, H., Sandoval, C. (2005). "Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas". Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica N° 272.
- Gorkem, C., Sengoz, B. (2009). "Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime". *Construction and Building Materials* 23 (6), pp. 2227-2236.
- Grenfell, J., Ahmad, N., Airey, G., Collop, A., Elliott, R. (2012). "Optimising the moisture durability SATS conditioning parameters for universal asphalt mixture application". *International Journal of Pavement Engineering* ,13 (5), pp. 433-450.
- Haddock, J.E., Hand, A.J.T., Fang, H., White, T.D. (2005). "Determining layer contributions to rutting by surface profile analysis". *Journal of Transportation Engineering* 131 (2), pp. 131-139.
- Howson, J., Masad, E.A., Bhasin, A. Castelo Branco V., Arambula, E., Lytton, R., Little D (2007). "System for the evaluation of moisture damage using fundamental material properties". *Technical Report* Number: FHWA/TX-07/0-4524-1. Texas Transportation Institute.
- Hu, S., Zhou, F., Scullion, T (2011). "Analysis of rutting performance impacting factors in HMA Overlay Mixture Design". *Journal of Testing and Evaluation*, 39 (6).
- Huang, B., Chen, X., Sun, X., Masad, E., Mahmoud, E. (2009). "Effects of coarse aggregate angularity and asphalt binder on laboratory-measured permanent deformation properties of HMA". *International Journal of Pavement Engineering*, 10 (1), pp. 19-28.
- Huang, J., Wu, S., Ma, L., Liu, Z (2009) "Material selection and design for moisture damage of HMA pavement". *Materials Science Forum* 614, pp. 269-274.

- Hunter, E.R., Ksaibati, K. (2002). "Evaluating moisture susceptibility of asphalt mixes". *Report Number: MPC-02-138*. Department of Transportation, University Transportation Centers Program.
- Izzo, R.P., Tahmoressi, M. (1999). "Use of the Hamburg wheel-tracking device for evaluating moisture susceptibility of hot-mix asphalt". *Transportation Research Record* (1681), pp. 76-85.
- Jahromi, S.G. (2009). "Estimation of resistance to moisture destruction in asphalt mixtures". *Construction and Building Materials*, 23 (6), pp. 2324-2331.
- Jonson D.R., Freeman, R.B. (2002). "Rehabilitation Techniques for Stripper Asphalt Pavements". *Report Number: FHWA/MT- 002-003/8/23*. Western Transportation Institute, Montana.
- Kandhal, P.S., Cooley Jr., L.A (2002a). "Evaluation of permanent deformation of asphalt mixtures using loaded wheel tester". *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, 71, pp. 739-753.
- Kandhal, P.S., Cooley Jr., L.A. (2002b). "Coarse-versus fine-graded superpave mixtures comparative evaluation of resistance to rutting". *Transportation Research Record* (1789), pp. 216-224.
- Kandhal, P.S., Mallick, R.B. (2001a). "Effect of Mix Gradation on Rutting potential of Dense-graded asphalt mixtures". *Transportation Research Record* (1767), pp. 146-151.
- Kandhal, P.S., Rickards, I.J (2001b). "Premature failure of asphalt overlays from stripping: Case histories". *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists* 70, pp. 301-351.
- Kanitpong, K. and Bahia, H, U. (2003). "Role of Adhesion and Thin Film Tackiness of Asphalt Binders in Moisture Damage of HMA." *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, 72, pp. 502-528.

- Kanitpong, K., Bahia, H.U. (2008). "Evaluation of HMA moisture damage in Wisconsin as it relates to pavement performance". *International Journal of Pavement Engineering* 9 (1), pp. 9-17.
- Khodaii, A., Haghshenas, H.F., Kazemi Tehrani, H. (2012). "Effect of grading and lime content on HMA stripping using statistical methodology". *Construction and Building Materials* 34, pp. 131-135.
- Kiggundu, B. M., Roberts, F. L. (1988). "Stripping in HMA Mixtures: State-of-the-Art and Critical Review of Test Methods". Report Number: NCAT 88-02. Ed. National Center for Asphalt Technology (NCAT), pp. 4-38. Auburn,Alabama
- Kim, Y.-R., Little, D.N., Lytton, R.L. (2004). "Effect of moisture damage on material properties and fatigue resistance of asphalt mixtures". *Transportation Research Record (1891)*, pp. 48-54.
- Kim, Y.-R., Lutfi, J.S., Bhasin, A., Little, D.N. (2008). "Evaluation of moisture damage mechanisms and effects of hydrated lime in asphalt mixtures through measurements of mixture component properties and performance testing". *Journal of Materials in Civil Engineering* 20 (10), pp. 659-667.
- Kim, Y.-R., Nakseok, K., Khosla, N.P. (1992). "Effects of aggregate type and gradation on fatigue and permanent deformation of asphalt concrete". *ASTM Special Technical Publication (1147)*, pp. 310-328.
- Kim, Y.-R., Park, H.M., Sacramento Aragão, F.T., Sudo Lutfi, J.E. (2009). "Effects of aggregate structure on hot-mix asphalt rutting performance in low traffic volume local pavements". *Construction and Building Materials*, 23 (6), pp. 2177-2182.
- Kim, Y.-R., Pinto, I., Park, S-W. (2012). "Experimental evaluation of anti-stripping additives in bituminous mixtures through multiple scale laboratory test results". *Construction and Building Materials* 29, pp. 386-393.

- Kok, B.V., Yilmaz, M. (2009). "The effects of using lime and styrene-butadiene-styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt". *Construction and Building Materials* 23 (5), pp. 1999-2006.
- Kraemer, C., Pardillo, J.M., Rocci, S., Romana, M.G., Sánchez Blanco, V., del Val, M.A. (2004). *Ingeniería de Carreteras*. Vol.II. Mc Graw Hill.
- Kringos, N., Scarpas, A. (2008). "Physical and mechanical moisture susceptibility of asphaltic mixtures". *International Journal of Solids and Structures* 45 (9), pp. 2671-2685.
- Little, D.N., Jones, D.R. (2003). "Chemical and Mechanical Processes of Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt Pavements". Moisture sensitivity of asphalt pavements: a national seminar. February. San Diego, California.
- Lu, X., Redelius, P. (2007). "Effect of bitumen wax on asphalt mixture performance". *Construction and Building Materials*, 21 (11), pp. 1961-1970.
- Mallick, R.B., Pelland, R., Hugo, F. (2011). "Use of accelerated loading equipment for determination of long term moisture susceptibility of hot mix asphalt". *International Journal of Pavement Engineering* 6 (2), pp. 125-136.
- Masad, E., Al-Omari, A., Lytton, R. (2006). "Simple method for predicting laboratory and field permeability of hot-mix asphalt". *Transportation Research Record* (1970), pp. 55-63.
- Mehrara, A., Khodaii, A. (2011). "Evaluation of asphalt mixtures moisture sensitivity by dynamic creep test". *Journal of Materials in Civil Engineering* 23 (2), pp. 212-219.
- Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras (2008). "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Artículos: 542- Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso y 543- Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas". Orden Circular 24/2008.

- Miro, R., Perez, F., Olivier, M., Moutier, F. (2002). "Evaluación de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas formuladas a partir de la normativa española y francesa". *Carreteras*, N^o. 120, pp. 7.
- Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A.R., Hamedi, G.H., Azarhoosh, M.J. (2012). "Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt". *Construction and Building Materials* 31, pp. 384-388.
- Mohammad, L.N., Herath, A., Huang, B.(2003). "Evaluation of Permeability of Superpave[®] Asphalt Mixtures". *Transportation Research Record* (1832), pp. 50-58.
- Montero, M. (2010), "Dosificación de mezclas bituminosas. Ensayo de Tipo". Jornada Técnica de Mezclas bituminosas; dosificación, fabricación, puesta en obra y control de calidad. Nueva orden Circular 24/2008. Barcelona.
- Morea, F. (2011). "Deformaciones permanentes en mezclas asfálticas: Efecto de la reología de los asfaltos, la temperatura y las condiciones de carga". *PhD Dissertation*, Universidad de la Plata.
- Morea, F., Agnusdei, J.O., Zerbino, R. (2011). "The use of asphalt low shear viscosity to predict permanent deformation performance of asphalt concrete". *Materials and Structures*, 44 (7), pp. 1241-1248.
- Movilla-Quesada, D., Vega-Zamanillo, A., Calzada-Pérez, M.A., Castro-Fresno, D. (2012). "Evaluation of water effect on bituminous mastics with different contribution fillers and binders". *Construction and Building Materials*, 29, pp.339-347.
- Özen, H (2011). "Rutting evaluation of hydrated lime and SBS modified asphalt mixtures for laboratory and field compacted samples". *Construction and Building Materials*, 25 (2), pp. 756-765.
- Padilla, A. (2004) "Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista". *PhD Dissertation*, Universidad Politécnica de Cataluña.

Peña, D. (1994). *Estadística 1: Fundamentos*. Editorial Universidad Textos.

Perraton, D., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., De La Roche, C., Bankowski, W., Partl, M., Grenfell, J. (2011). "Rutting of bituminous mixtures: Wheel tracking tests campaign analysis". *Materials and Structures*, 44 (5), pp. 969-986.

PG-3 (2004). Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes. Cuarta edición. Ediciones Liteam.

Potti, J.J. (2007). "Los nuevos tipos de mezclas. La serie de normas EN 13108". *Jornada Técnica del Mercado CE de las mezclas bituminosas*. Barcelona.

Poulikakos, L.D., Partl, M.N. (2009). "Evaluation of moisture susceptibility of porous asphalt concrete using water submersion fatigue tests". *Construction and Building Materials*, 23 (12), pp. 3475-3484.

Qing, L., Harvey, J. T. (2005). "Investigation of Conditions for Moisture Damage in Asphalt Concrete and Appropriate Laboratory Test Methods". *Report Number: UCPRC-RR-2005-15*. Pavement Research Centre. University of California.

Rebollo, O., Botasso, G., Soengas, C., Nieto, J. P. . (2010) "Medición del ahuellamiento en Mezclas Densas en Caliente". *XXXVI Reunión del Asfalto*. 29 de Noviembre – 3 de Diciembre de, Buenos Aires, Argentina.

Reyes, O.J., Camacho, T. (2008). "Influencia de la granulometría en la resistencia al ahuellamiento de mezclas asfálticas". *Ingeniería y Universidad*, 23(1), pp. 26-42.

Rubio, B. (2007), "Las nuevas normas de ensayo EN-12697". *Jornada Técnica: El Mercado CE y la normativa de reducción de emisiones*. Sevilla. Abril.

Ruiz, A. (2001). "Dosificación de mezclas bituminosas". *Jornada sobre caracterización y control de calidad de mezclas bituminosas*. Sevilla.

Sengoz, B., Agar, E. (2007). "Effect of asphalt film thickness on the moisture sensitivity characteristics of hot-mix asphalt". *Building and Environment*, 42 (10), pp. 3621-3628.

- Shah, B. D, (2003). "Evaluation of moisture damage within asphalt concrete mixes". *PhD Dissertation*, Texas A&M University.
- Solamanian, M.; Harvey, J.; Tahmoressi, M.; Tandon, V. (2003) "Test method to predict moisture sensitivity of hot mix asphalt pavements". Moisture sensitivity of asphalt pavements: a national seminar. February. San Diego, California.
- Sousa, J.E., Solamanian, M., Weissman, S.L.. (1994). "Development and Use of the Repeated Shear Test (Constant Height): An Optional Superpave Mix Design Tool". *Report Number: A-698*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
- Steyn, WJvdM , Denneman, E , Mahlangu, S (2008). "Comparison between the permanent deformation behaviour of a standard and a rut resistant HMA (hot- mix asphalt) mix". Partnership for research and progress in Transportation. *27th Southern African Transport Conference (SATC)*, Pretoria, South Africa.
- Sunghwan K., Coree B.J. (2005). "Evaluation of hot mix asphalt moisture sensitivity using the Nottingham Asphalt Test Equipment". Report No. IHRB Project TR-483.
- Suo, Z., Wong, W. G. (2009). "Nonlinear properties analysis on rutting behavior of bituminous materials with different air void contents". *Construction and Building Materials*, 23 (12), pp.3492-3498.
- Tayfur, S., Ozen, H., Aksoy, A. (2007). "Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers". *Construction and Building Materials*, 21 (2), pp. 328-337.
- Tehama county public works. Cita electrónica, página web:
<http://www.tehamacountypublicworks.ca.gov> , acceso: 13/07/2012
- Terrel, R.L. and Al-Swailmi, S. (1994). "Water Sensitivity of Asphalt – Aggregate Mixes: Test Selection". *Report Number: SHRP-A-403*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.

- Thenoux, G., Carrillo, H (2002) "Análisis de Casos de Ahuellamiento en Mezclas Asfálticas Chilenas". *6° Congreso Internacional Gestión y Desarrollo del Mantenimiento Vial*, Chile.
- Topal, A., Sengoz, B. (2005). "Determination of fine aggregate angularity in relation with the resistance to rutting of hot-mix asphalt". *Construction and Building Materials*, 19 (2), pp. 155-163.
- Topal, A., Sengoz, B. (2008). "Evaluation of compacted aggregate resistant test compared with the fine aggregate angularity standards". *Construction and Building Materials*, 22 (5), pp. 993-998.
- Verhaeghe, BMJA , Myburgh, PA , Denneman, E (2007) Asphalt rutting and its prevention. *9th Conference Asphalt pavements for Southern Africa*, pp. 1-22. Gaborone, Botswana.
- Viswanathan, A. G. (2005). "Investigation of Moisture Sensitivity of Hot Mix Asphalt Concrete". *PhD Dissertation*, University of West Virginia.
- Wang, H., Zhang, Q., Tan, J. (2009). "Investigation of layer contributions to Asphalt Pavement Rutting". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21 (4), pp. 181-185.
- Williams, C. R., Hill, D.W., Rottermond, M.P. (2005). "Utilization of an Asphalt Pavement Analyzer for Hot Mix Asphalt Laboratory Mix Design". *Journal of ASTM International*, 2 (4), pp. 91-115.
- Williams, R. C., Prowell B. D. (1999). "Comparison of Laboratory Wheel-Tracking test results with Westrack Performance". *Transportation Research Record* (1681), pp. 121-128.
- Xu, T., Huang, X. (2012). "Investigation into causes of in-place rutting in asphalt pavement". *Construction and Building Materials*, 28 (1), pp. 525-530.
- Zhang, J., Cooley Jr., L.A., Kandhal, P.S. (2002). "Comparison of Fundamental and Simulative test methods for evaluating permanent deformation of hot mix asphalt". *Transportation Research Record* (1789), pp. 91-100.