

Proyecto Fin de Máster  
Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

# Estudio Comparado de Afinidad Árido-Betún en Hormigones Bituminosos

Autor: Ismael Martín Martín

Tutor: Blas González González

Departamento de Construcciones Arquitectónicas I  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla



Sevilla, 2019





Proyecto Fin de Máster  
Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

# **Estudio Comparado de Afinidad Árido-Betún en Hormigones Bituminosos**

Autor:

Ismael Martín Martín

Tutor:

Blas González González

Profesor de Construcciones Civiles

Departamento de Construcciones Arquitectónicas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Máster: Estudio Comparado de Afinidad Árido-Betún en Hormigones Bituminosos

Autor: Ismael Martín Martín

Tutor: Blas González González

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo Fin de Master arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal



# Agradecimientos

---

Dice un refrán: “*es de buen nacido ser agradecido*” ...

Concluir mis estudios universitarios con la titulación de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos es un gran logro personal, ya que el camino ha sido duro, lleno de dificultades y momentos débiles que me han llevado a perder la meta de vista, pero en esos momentos de flaqueza siempre he contado con personas maravillosas que me han apoyado y recordado el valor del esfuerzo.

En primer lugar, quiero dar las gracias a mi familia, ellos forman los cimientos de mi vida, por lo que todo lo que pudiera decir sobre ellos, es poco. Desde mis abuelos, pasando por mis tíos y primos, siguiendo por mis padres Manuel y Josefa, hasta mi hermana Azucena, pilar fundamental para mí. Gracias a ti, papá, me has permitido elegir el camino que he querido, el que me apasiona, un camino desconocido. Si hubiese elegido continuar con tu negocio, todo habría sido más sencillo, pero no tendría motivación, ni habría conocido lo que tú has sufrido hasta llegar donde estás. Habéis sido los encargados de hacerme creer en mí mismo y que con esfuerzo constante se pueden alcanzar muchas metas.

A mis amigas y amigos, porque sois los encargados de hacer que mi sonrisa nunca desaparezca. Gracias por alegrarme los días.

A mis compañeros de la carrera, pero en especial a Andrés, Antonio, Benito y Juan Luis, sois mucho más que compañeros. Sois unos grandes amigos para mí. Sin ustedes no habría sido posible. Hemos sido un equipo, una segunda familia para mí en Sevilla, al que cada uno ha aportado su granito de arena y siempre de forma compenetrada. Ojalá que nunca se pierda esta bonita amistad.

A mi tutor, D. Blas González González, por la oportunidad que me ha brindado con este trabajo, por guiarme, por su tiempo, por invitarme a continuar cuando el trabajo no lo veíamos claro, pero sobre todo por las capacidades e inquietudes que ha despertado en mí durante este trabajo. Te considero un referente tanto a nivel académico, como personal.

Mi más sincero agradecimiento a Marta Wasilewska, profesora en Bialystok University of Technology, por su colaboración desinteresada.

No puedo olvidar a todos mis profesores tanto de la Universidad de Sevilla como de la Universidad de Córdoba, ellos han sido los encargados de transmitirme los conocimientos necesarios para intentar abrirme paso en el complicado mundo de la ingeniería.

Mi paso por la constructora CONSTRUCCIONES MAYGAR, ha despertado en mí el interés por las mezclas asfálticas, ya que aprendo cada día de los mejores del sector.

A todo su equipo, gracias.

*Ismael Martín Martín*

*Sevilla, 2019*





# Resumen

---

En este proyecto vamos a analizar la adhesión existente entre los elementos principales de una mezcla bituminosa caliente. Para ello, el punto de partida ha sido un estudio del “estado del arte” del tema que nos ocupa.

La durabilidad de las mezclas asfálticas, su resistencia mecánica, resistencia al envejecimiento y resistencia a las condiciones climáticas, vienen determinadas por el grado de adhesión entre el árido y el betún.

Para comprender el comportamiento de los elementos árido-betún y analizar la interacción existente entre ambos al mezclarlos, se han realizado una serie de ensayos en laboratorio. Dichos ensayos pretenden analizar el comportamiento de varios tipos de áridos con una tipología de betún convencional, recogido en el PG3, como el idóneo para la zona sur de España.

El grupo de áridos elegidos, combina áridos de cantera y un tipo de áridos procedentes de reciclaje de la fundición de altos hornos, quizás una posible futura vía de desarrollo.

De forma experimental hemos seguido los procedimientos marcados por las normas UNE EN 12697-11 y PN-84/B-06714/22, que vienen a desarrollar ensayos agresivos que simulan, de forma acelerada, el desgaste del hormigón bituminoso, producido por condiciones climáticas adversas, deterioros por envejecimiento, rodadura de vehículos. Tras analizar dicho desgaste, se determina el grado de cobertura de betún existente en los áridos según los tiempos marcados por ambas normativas.

Con los resultados obtenidos, podemos determinar qué tipología de árido es la que se ha comportado mejor como solución viable a los ensayos de desgaste que hemos analizado.

Dichos resultados resultan aplicables a dos casos muy concretos que ocurren en la ciudad de Sevilla y que preocupa enormemente a la Gerencia de Urbanismo de la ciudad, ya que actualmente no han conseguido dar solución a los mismos. Estos problemas vienen constituidos por las deformaciones en el pavimento que generan los autobuses en las frenadas y la demolición del mismo al paso de los coches de caballos, debido a las pisadas de los equinos.

Gracias al estado del arte, los resultados de los ensayos realizados, a las numerosas charlas sobre mezclas bituminosas que he asistido y a mi experiencia profesional propongo como solución a los problemas existentes en la pavimentación en puntos concretos de la ciudad Sevilla, emplear una mezcla bituminosa diferente a la que actualmente están extendiendo y que se ve desarrollada en este trabajo de investigación.



# Abstract

---

In this Project. I am going to analyze the adherence between the main elements in hot asphalt. The starting point in this case is the research of the main point I am going to explain.

Durability of asphaltic mixes, their mechanic, time and climate conditions resistance, are determined by the degree of adhesion between aggregate and bitumen.

If we want to comprehend the performance between aggregate-bitumen and analyzing the interactions they produce when mixed, It is important to test said interactions in a laboratory. These tests aim to analyze the behavior of different types of aggregates with certain types of conventional bitumen; as given in PG3, for being the most suitable for southern part of Spain.

The chosen type of aggregate, contains quarry aggregates and slag.

We have been observing the procedures stated by the UNE EN 12697-11 and PN-84/B-06714/22 that come to explain how aggressive and accelerated the attrition of hot mix asphalt can be and how it can be produced by the climate and traffic conditions.

Once the observation of the attrition has been done, we have to establish the level of bitumen in the surface of the aggregate as it is implied in the standards.

When the results of these tests are obtained, we will be able to specify what type of aggregate has been the one with better resistance rate to attrition.

Results can apply to some specific cases that happen in the city of Sevilla and worry the town-planning management of the city, mainly because they have not been able to find a proper solution so far... these problems come from deformations of the surface caused by the traffic of buses and horse carriages.

Thanks to this research, the results of the different tests and the several conferences about hot mix asphalt I have assisted and my professional experience, I propose to use a different mix of hot mix asphalt in the city of Sevilla. Are that you can find more detailed in this project.



# Índice General

Agradecimientos .....	vii
Resumen .....	ix
Abstract .....	xi
Índice General .....	xiii
Índice de Tablas .....	xvi
Índice de Figuras .....	xviii
<b>1 Introducción .....</b>	<b>21</b>
1.1 <i>Objetivos del Máster</i> .....	21
1.2 <i>Objetivos Trabajo Fin de Máster</i> .....	22
1.3 <i>Descripción de la Problemática</i> .....	22
<b>2 Metodología .....</b>	<b>25</b>
<b>3 Estado del Arte .....</b>	<b>29</b>
3.1 <i>Hormigones Asfálticos (Mezclas Bituminosas)</i> .....	29
3.1.1 Composición .....	29
3.1.1.1 Áridos .....	29
3.1.1.2 Ligantes Hidrocarbonados.....	31
3.1.2 Tipología de Mezclas .....	32
3.1.3 Propiedades .....	34
3.1.4 Diseño de Mezclas Bituminosas en Caliente.....	39
Cuando hablamos del diseño de una mezcla bituminosa, nos referimos a la fase que sigue las pautas del proyecto de mezcla buscado; es decir, la fase donde se decide el tipo de mezcla que se va a crear, los materiales básicos como áridos y betún y el espesor de la capa más óptimo para las condiciones a las que se va a someter. ....	39
La dosificación abarca la caracterización y definición de los componentes de la mezcla, las proporciones de los distintos materiales usados, para obtener así la máxima estabilidad y durabilidad. ....	39
3.2 <i>Marcado CE</i> .....	40
3.2.1 Descripción resumen de la Normativa Europea.....	44
3.2.2 Adaptación al PG-3 .....	45
3.3 <i>Teorías de la Adhesión en Mezclas</i> .....	46
3.3.1 Teoría Sobre las Reacciones Químicas.....	49
3.3.2 Teoría de la Orientación Molecular .....	49
3.3.3 Teoría Mecánica .....	49
3.3.4 Enfoque Termodinámico.....	50
3.3.5 Observaciones sobre las Teorías de Adhesión .....	50
3.4 <i>Factores que Afectan a la Adhesión en Hormigones Asfálticos</i> .....	50
3.4.1 Propiedades de los Betunes.....	52
3.4.1.1 Constitución del Betún .....	52
3.4.1.2 Tensión Superficial.....	53
3.4.1.3 Viscosidad.....	53
3.4.2 Propiedades de los Áridos.....	53

3.4.2.1	Composición Mineralógica.....	54
3.4.2.2	Composición Química .....	54
3.4.2.3	Energía de Superficie.....	54
3.4.2.4	Meteorización.....	54
3.4.2.5	Textura de Superficie .....	54
3.4.2.6	Tamaño.....	55
3.4.2.7	Forma y Angularidad .....	55
3.4.2.8	Porosidad y Distribución del Tamaño de Poro .....	55
3.4.2.9	Impurezas en la Superficie del Árido .....	56
3.4.3	Propiedades de la Mezcla que Afectan Directamente a la Adhesión .....	56
3.4.3.1	Alto Contenido en Huecos y Permeabilidad.....	56
3.4.3.2	Espesor de la Cobertura del Betún sobre el Árido .....	57
3.4.4	Influencias Externas .....	57
3.4.4.1	Temperatura.....	58
3.4.4.2	Tráfico .....	58
3.4.4.3	Calidad de la Ejecución en la Obra.....	59
3.4.4.4	Presencia de Agua .....	59
3.5	<i>Acción del Agua sobre Hormigones Bituminosos</i> .....	60
3.5.1	Descripción.....	60
3.5.2	Medios de Conducción del Agua .....	60
3.5.3	Mecanismos de Fallos Originados por el Agua .....	61
3.5.4	Manifestaciones de los Daños Originados por el Agua en el Firme .....	62
3.5.5	Factores que Contribuyen en los Daños Originados por el Agua.....	62
3.5.5.1	Factores Internos.....	62
3.5.5.2	Factores Externos.....	64
3.5.6	Procedimientos para Apaliar la Sensibilidad al Agua.....	64
<b>4</b>	<b>Investigaciones Realizadas.....</b>	<b>67</b>
4.1	<i>Determinación de la Sensibilidad al Agua Mediante Ensayos de Laboratorio</i> .....	67
4.1.1	Métodos de Ensayo para Mezclas Bituminosas sin Compactar .....	67
4.1.2	Métodos de Ensayo para Mezclas Bituminosas Compactadas .....	68
4.2	<i>Métodos de Ensayo para Determinar el Efecto del Agua en España: UNE-EN 12697-12</i> .....	70
4.2.1	Sensibilidad al Agua. UNE-EN 12697-12, Método C.....	71
4.3	<i>Métodos de Ensayo para Determinar el Efecto del Agua en Polonia: PN-84/B-06714/22 y EN 12697-11</i> .....	71
4.3.1	Determinación de la Adhesión del Betún. (Método de Ensayo para Asfalto Caliente). PN-84/B-06714/22.....	71
4.3.2	Determinación de la Afinidad entre Árido y Betún. UNE-EN 12697-11.....	74
4.3.3	Ensayo PN-84/B-06714/22 frente EN 12697-11 (Resultados obtenidos).....	77
4.4	<i>Propuestas para Mejorar la Adhesión y Características de una Mezcla</i> .....	95
<b>5</b>	<b>Problemática actual en Sevilla .....</b>	<b>98</b>
5.1	<i>Deformaciones debidas al tráfico de autobuses</i> .....	98
5.2	<i>Deformaciones debidas al tráfico de caballos</i> .....	102
<b>6</b>	<b>Algunas ideas para el futuro de las mezclas bituminosas.....</b>	<b>108</b>
<b>7</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>110</b>
<b>8</b>	<b>Nuevas Líneas de Trabajo .....</b>	<b>113</b>
<b>9</b>	<b>Anexo Datos de Trabajo.....</b>	<b>115</b>
	<b>Referencias .....</b>	<b>119</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 3-1. Clasificación de aglomerados asfálticos (Bañón Blázquez, 2000)	32
Tabla 3-2. Designación mezclas bituminosas según normas europeas	42
Tabla 3-3. Designación específicas para capa de rodadura según normas europeas	43
Tabla 4-1. Peso de la muestra ensayada	72
Tabla 4-2. Temperatura a la que se somete la mezcla	72
Tabla 4-3. Resultados obtenidos del ensayo de botella rodante	77
Tabla 4-4. Resultados obtenidos del ensayo de ebullición	86





# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2-1. Metodología	25
Figura 3-1. Ciclo geológico (Blanco Ferrero)	31
Figura 3-2. Deformación plástica generada por mala dosificación de la mezcla	36
Figura 3-3. Deformación plástica generada por esfuerzos horizontales	37
Figura 3-4. Fisuración pavimento por fatiga, conocida como “piel de cocodrilo”	38
Figura 3-5. Materiales que componen una mezcla bituminosa	40
Figura 3-6. Etapas de un producto para recibir el marcado C.E.	41
Figura 3-7. El sistema de betún-agua-árido en el ángulo $\Theta > 90^\circ$	47
Figura 3-8. El sistema de betún-agua-árido en el valor de ángulo deseado $\Theta < 90^\circ$	48
Figura 3-9. ido poroso (Ej. Escoria de acero) y no poroso (Ej. Caliza)	48
Figura 3-10. Esquema/resumen de los factores que afectan a la adherencia de los hormigones asfálticos	51
Figura 3-11. Esquema de textura de superficie de un pavimento de asfalto	55
Figura 3-12. Componentes básicos de los áridos: forma, textura y angularidad	55
Figura 3-13. Cisterna regadora empleada para la aplicación del betún	59
Figura 4-1. Calentamiento de vaso de precipitación con agua destilada y áridos recubiertos de betún	73
Figura 4-2. Árido cubierto de betún	73
Figura 4-3. Frasco de prueba con varilla	75
Figura 4-4. Máquina de rotación de botellas (A) y botella de prueba (B)	76
Figura 4-5. Grado de recubrimiento de partículas	76
Figura 4-6. Gráfica de resultados obtenidos del ensayo de la botella rodante	78
Figura 4-7. Clasificación de la forma de los áridos	78
Figura 4-8. Granito después de 6 horas de ensayo	79
Figura 4-9. Granito después de 24 horas de ensayo	79
Figura 4-10. Basalto después de 6 horas de ensayo	80
Figura 4-11. Basalto después de 24 horas de ensayo	80
Figura 4-12. Escoria de acero después de 6 horas de ensayo	81
Figura 4-13. Escoria de acero después de 24 horas de ensayo	81
Figura 4-14. Caliza después de 6 horas de ensayo	82
Figura 4-15. Caliza después de 24 horas de ensayo	82
Figura 4-16. Resultado de granito con método de botella	83
Figura 4-17. Resultado de basalto con método de botella	83
Figura 4-18. Resultado de caliza con método de botella	84
Figura 4-19. Resultado de escoria de fabricación de acero con método de botella	84
Figura 4-20. Diferencia entre 6h y 24h de ensayo de botella	85
Figura 4-21. Gráfica de resultados del método de ebullición	86

Figura 4-22. Granito después de 3 minutos de ebullición – primera muestra	87
Figura 4-23. Granito después de 3 minutos de ebullición – segunda muestra	87
Figura 4-24. Basalto después de 3 minutos de ebullición – primera muestra	88
Figura 4-25. Basalto después de 3 minutos- segunda muestra	88
Figura 4-26. Escoria de fabricación de acero después de 3 minutos: primera muestra	89
Figura 4-27. Escoria de fabricación de acero después de 3 minutos de ebullición – segunda muestra.	89
Figura 4-28. Piedra caliza después de 3 minutos de ebullición – primera muestra	90
Figura 4-29. Piedra caliza después de 3 minutos de ebullición – primera muestra	90
Figura 4-30. Comparación de método polaco y europeo	91
Figura 4-31. Comparación de granito después de la prueba de botella rodante (6h, 24h) y después de la prueba de ebullición	91
Figura 4-32. Comparación de basalto después de la prueba de botella rodante (6h, 24h) y después de la prueba de ebullición	92
Figura 4-33. Comparación de caliza después de la prueba de botella rodante (6h, 24h) y después de la prueba de ebullición	92
Figura 4-34. Comparación de la escoria de fabricación de acero después de la prueba de botella rodante (6h, 24h) y después de la prueba de ebullición	93
Figura 4-35. Superficie de granito con microscopio	93
Figura 4-36. Superficie de caliza con microscopio	94
Figura 4-37. Superficie de escoria de acero con microscopio	94
Figura 4-38. Superficie de escoria de acero con microscopio	95
Figura 4-39. Superficie de basalto con microscopio	95
Figura 5-1. Deformaciones-roderas originadas por la rodadura de autobús (c/Palos de la Frontera y c/Virgen de Luján).	99
Figura 5-2. Roderas debidas al fallo de la capa de rodadura. (Alejandro Padilla, estudio UPC)	99
Figura 5-3. Roderas debidas al fallo en la subrasante. (Alejandro Padilla, estudio UPC)	100
Figura 5-4. Exudación por exceso de betún	100
Figura 5-5. Deformaciones, fisuras y baches por pérdida de capacidad portante en parada de bus (Av/ Menéndez Pelayo)	101
Figura 5-6. Estado de esfuerzos en un pavimento debido al movimiento de una rueda. (Federico París Carballo, 1998, Teoría de la Elasticidad)	102
Figura 5-7. Deterioro del pavimento originadas por caballos (c/ Paseo de las Delicias)	103
Figura 5-8. Deterioro del pavimento originadas por caballos, incluso desaparición de señalización horizontal (c/ Palos de la Frontera).	104
Figura 5-9. Deterioro del pavimento asfáltico y de adoquines de granito originadas por caballos (Parque María Luisa).	105
Figura 5-10. Deterioro del pavimento originadas por caballos (Av/ El Cid)	105
Figura 5-11. Herraduras con vidias	106
Figura 5-12. Herraduras de goma para evitar empleo vidias	106



# 1 INTRODUCCIÓN

---

*Intenta no volverte un hombre de éxito, sino volverte un hombre de valor.*

*- Albert Einstein -*

La realización del presente Trabajo de Fin de Máster, lleva por título “Estudio Comparado de Afinidad Árido-Betún en Hormigones Bituminosos” y permite la evaluación de 12 créditos que le otorga el Plan de Estudio. Se enmarca dentro los objetivos académicos para superar y culminar el Máster Universitario de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Sevilla. Este está compuesto de 120 créditos ECTS divididos en dos cursos.

El trabajo se ha realizado por el alumno Ismael Martín Martín bajo la coordinación D. Blas González González, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, y profesor perteneciente al Departamento Construcciones Arquitectónicas I de la Universidad de Sevilla, que imparte clases en las asignaturas: “Complemento de Construcciones Civiles” y “Planificación Territorial y de Infraestructuras Civiles”.

El Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos es el nivel superior del título en Grado en Ingeniería Civil, el cual, Ismael Martín Martín obtuvo en la Universidad Politécnica de Bélmez (Córdoba) en el año 2015.

## 1.1 Objetivos del Máster

La llegada del Plan Bolonia a los estudios Universitarios, ha producido confusión entre las equivalencias de Ingenierías Técnicas y Superiores del plan antiguo, respecto los actuales grados. Tras esta problemática, el Ministerio de Educación publicó en el Boletín Oficial del Estado que los graduados en Ingeniería Civil heredan las competencias profesionales de los Ingenieros Técnicos de Obras Públicas (ITOP), titulación ya inexistente y sustituida por el Grado en Ingeniería Civil, por lo que los estudios de este Máster otorgan las competencias para el ejercicio de la profesión de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (ICCP).

El principal objetivo que el Máster tiene en la Universidad de Sevilla es formar ingenieros con gran cualificación en el campo de la ingeniería civil. De esta forma sus alumnos podrán acceder al mercado laboral con una formación sólida en la materia para afrontar los problemas a resolver.

Otro objetivo marcado a lo largo de estos dos años de estudios por parte de la comisión académica del Máster, es que cualquier alumno ha de ser capaz de trabajar en equipo, ejerciendo diferentes responsabilidades y ser capaz de aprender de forma autónoma para estar al día en su profesión, llegando a ser capaz de tomar decisiones correctas ante situaciones imprevistas.

## 1.2 Objetivos Trabajo Fin de Máster

El principal objetivo de este trabajo de investigación, consiste en el estudio del comportamiento de interacción árido-betún de las mezclas bituminosas calientes para poder avanzar en la línea de mejora de la adhesión entre dichos componentes.

En concreto, se trata de realizar un estudio profundo del Estado del Arte del tema a estudiar en este trabajo de investigación. Para ello se pretende definir y explicar los métodos actualmente existentes para la determinación de la adhesividad, tras un proceso físico-químico que origine la pérdida de cobertura del betún en la superficie del árido, tanto en métodos compactados como sin compactar. De esta forma se realizará un inventario de dichos métodos.

Para obtener datos reales y así analizar los resultados, se emplearán mezclas bituminosas calientes sin compactar en varios ensayos de carácter subjetivos ya que los resultados se determinarán de forma visual por el laborante. Este carácter subjetivo no nos permitirá dar cifras exactas, pero sí valores aproximados que proporcionan una idea del comportamiento de cada una de las mezclas con las que se va a trabajar. Así se podrán aportar recomendaciones en cuanto a las prescripciones técnicas exigibles a las mezclas bituminosas en caliente ensayadas.

Todo campo relacionado con la investigación puede abrir nuevas líneas de investigación, ya que, si se conocen los Métodos Empíricos que actualmente se desarrollan en los laboratorios, se pueden comparar y comenzar a construir los cimientos para el desarrollo de nuevos métodos de estudios o mejorar los ya existentes.

## 1.3 Descripción de la Problemática

Existen una serie de circunstancias, periodos de tiempo o factores en la corta vida del autor del presente documento, que han dado lugar a despertar su interés por el mundo de las mezclas asfálticas. Es por ello, que, tras la lectura de numerosos documentos sobre este tema, se ha observado como a nivel internacional el estudio de la adhesión árido-betún está centrado tanto en mezclas compactadas como en mezclas sin compactar, existiendo numerosas publicaciones centradas en ambas ramas.

En contraposición, en España el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) se centra en mezclas bituminosas compactadas en gran medida, y sólo tocando levemente mezclas sin compactación. Es por ello la escasez de estudios a nivel nacional sobre la adhesión árido-betún en mezclas bituminosas sin compactar.

El PG-3 en el capítulo IV “Mezclas Bituminosas”, artículo 542 “Mezclas bituminosas tipo de hormigón bituminoso”, cita constantemente que la adhesividad y la cohesión de la mezcla compactada se ha de tener en cuenta empleando la norma UNE-EN 12697-12: 2009 (Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa), mediante los métodos:

- a) Método A: emplea la resistencia a la tracción indirecta de probetas cilíndricas de mezclas bituminosas.
- b) Método B: emplea la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de mezclas bituminosas.

Es decir, con estos ensayos se puede determinar valores de resistencia a tracción indirecta y compresión de las probetas, pero no podemos determinar el porcentaje o valor de adherencia que se mantendrá adherido tras someterlo a un proceso físico-químico que permita la pérdida de betún en la superficie del árido. Para ello se ha de emplear la misma norma, pero en este caso el método:

- c) Método C: define el valor de adherencia de mezclas bituminosas, una hora después del proceso de mezclado, donde la unión entre el betún y árido puede identificarse como el valor de adherencia.

Este método no es mencionado por el PG-3, pero en el capítulo IV “Mezclas Bituminosas”, artículo 543.5.1.4 “Sensibilidad al agua”, se menciona que “en cualquier circunstancia se comprobará la adhesividad árido-betún

o ligante mediante la caracterización de la acción del agua”, por lo que se puede intuir que se ha de estudiar con el método “C” planteado, pero en ningún momento deja claro con exactitud, que procedimiento se ha de seguir para que la muestra cumpla unos requisitos mínimos de adhesión.

Quizás esta deficiencia en el estudio de la afinidad entre los elementos de la muestra sin compactar proviene con anterioridad al PG-3. En el pasado las mezclas bituminosas en España se basaban en las normas NLT, las cuales tampoco analizaban la adhesión. Estas normas existían antes de la entrada en vigor de las Normas Europeas, que permitió caracterizar las mezclas bituminosas y que cumpliesen así el Mercado CE para la libre circulación de productos. La norma que más se acerca al ámbito en el que se ubica el estudio es la NLT-145/72 “Envuelta de Áridos con betún”, la cual sólo estudia que porcentaje de árido queda recubierto de betún una vez que se ha mezclado la muestra, pero no emplea ningún proceso que implique una pérdida de betún para el estudio de la adhesión.

Gracias al estudio de todo lo relacionado con estos temas y mi trabajo en una constructora, he podido ir dando sentido a la solución que necesitan una serie de problemas existentes en la pavimentación de puntos concretos de la ciudad de Sevilla. Estos puntos vienen originados por el tránsito de caballos y autobuses, a los cuales la Gerencia de Urbanismo es la encargada de dar solución.





## 2 METODOLOGÍA

*El éxito es aprender a ir de fracaso en fracaso sin desesperarte.*

*- Winston Churchill -*

Para poder llevar a cabo los distintos puntos del “Estudio Comparado de Afinidad Árido-Betún en Hormigones Bituminosos”, realizando un análisis del Estado del Arte en el que se encuentra el tema, he establecido el siguiente esquema de trabajo recogido en la Figura 2-1:

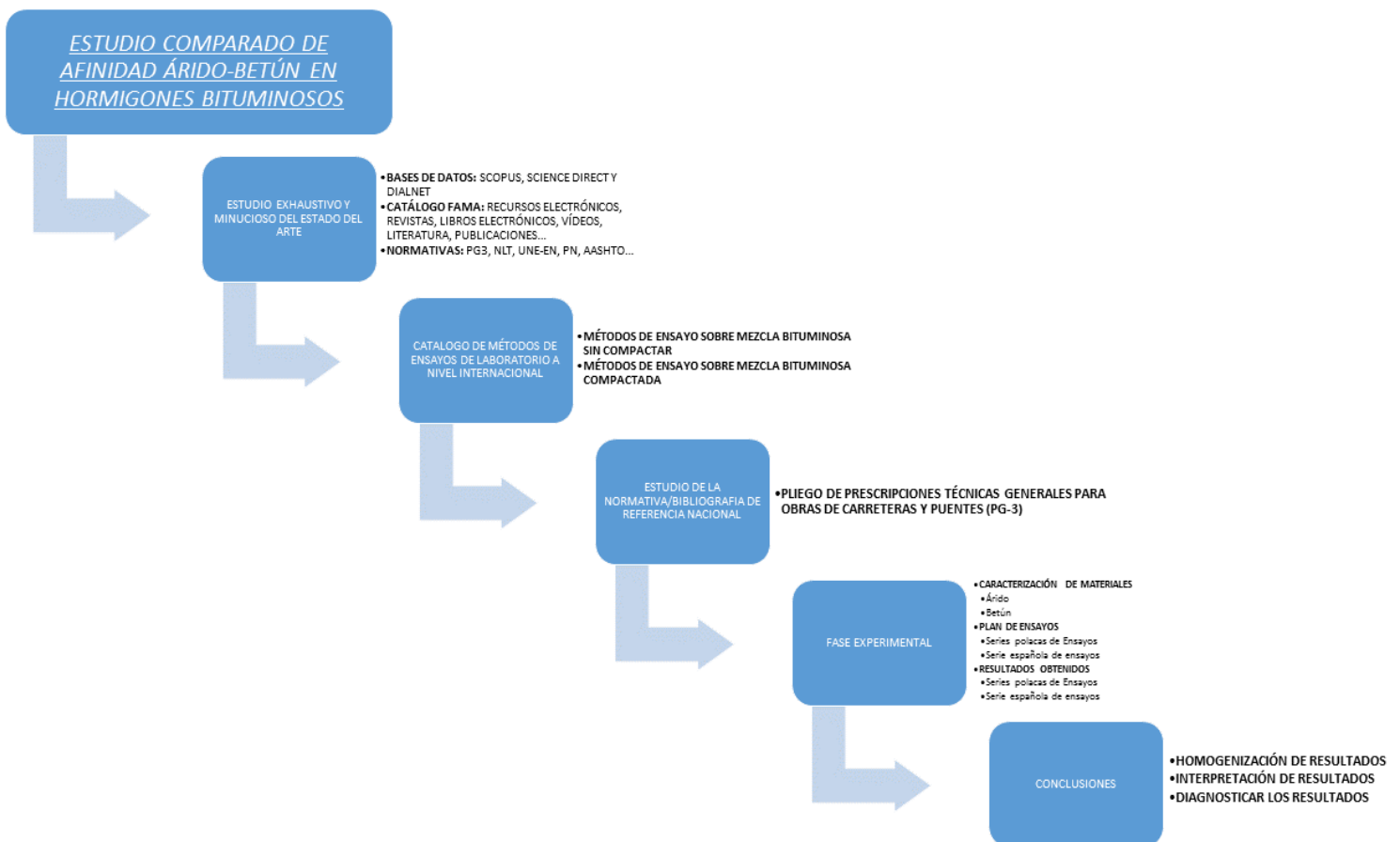


Figura 2-1. Metodología

Las fases a seguir serán:

- i. ESTADO DEL ARTE: Por un lado, se realizará un análisis del estado actual del tema de estudio, basado en la recopilación de las investigaciones realizadas hasta la fecha y disponible. Esta información se obtendrá principalmente de las bases de datos Scopus, Science Direct y Dialnet, junto al catálogo Fama que dispone la biblioteca de la Universidad de Sevilla. De estas diferentes fuentes de búsqueda se extraerá el comportamiento de las mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso, frente a la acción del agua como principal agente de la pérdida de afinidad entre el árido y el betún.
- ii. CATALOGO DE MÉTODOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO A NIVEL INTERNACIONAL: Tras una inicial búsqueda se ha obtenido que a nivel internacional existen publicaciones que estudian la adhesión entre el árido y el betún, pero sin seguir un mismo método de estudio. Se propone la realización de un inventario de los métodos de ensayo realizados de ámbito internacional. Estos métodos siguen dos vías claramente diferenciadas para la determinación de la adhesión árido-betún:
  - i. Métodos de ensayo sobre mezcla bituminosa sin compactar.
  - ii. Métodos de ensayo sobre mezcla bituminosa compactada.
- iii. ESTUDIO DE LA NORMATIVA/BIBLIOGRAFIA DE REFERENCIA NACIONAL: A nivel nacional los estudios sobre este tema son mínimos, casi inexistentes. El capítulo V “Mezclas bituminosas”, artículo 542 “Mezclas bituminosas tipo de hormigón bituminoso” del PG-3, menciona en el apartado 543.5.1.4, lo siguiente: “En cualquier circunstancia se comprobará la adhesividad árido-ligante mediante la caracterización de la acción del agua”. Para ello se ha de emplear la norma UNE-EN 12697-12: 2009 (Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa.), que sustituye a las antiguas NLT-162 (Efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas bituminosas compactadas. Ensayo de inmersión-compresión) y NLT-145 (Envuelta de áridos).
- iv. FASE EXPERIMENTAL: Se encuentra basada en métodos de ensayo sobre mezcla bituminosa sin compactar. Inicialmente se realizará una primera serie de ensayos siguiendo la normativa polaca con código PN-84/B-06714/22 (Determinación de la adhesión del betún. Método de ensayo para asfalto caliente). Posteriormente, se realizará una segunda serie de ensayos empleando la norma europea UNE-EN 12697-11: 2012 (Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 11: Determinación de la afinidad entre áridos y betún.). Por último, se realizará una tercera serie de ensayos basados en la normativa exigida por el PG-3, siendo esta la norma UNE-EN 12697-12: 2009 (Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa).
  - a. Caracterización de materiales con orígenes polacos:
    - i. Áridos: Se mostrará la procedencia, tipología, composición y características como proporción de partículas trituradas, índice de lajas, resistencia a la fragmentación, resistencia al pulimento, contenido de impurezas, densidad relativa y absorción.
    - ii. Betún: Se empleará un betún de tipo convencional, exponiéndose sus principales características como grado de penetración, punto de reblandecimiento, punto de rotura.
  - b. Plan de ensayos:
    - i. Dos series de ensayos, se realizarán en el laboratorio de materiales de Bialystok University of Technology (Polonia), bajo la supervisión de la profesora titular Marta Wasilewska.
    - ii. La tercera serie de ensayos, se llevará a cabo en España, en el laboratorio de materiales del que dispone Construcciones MAYGAR S.L, en la localidad de La Roda de Andalucía. Estos ensayos no se centran en la adhesión árido-betún, ya que se precisa de maquinaria muy específica, tratan de conocer las mezclas asfálticas bajo la supervisión del Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, D. Juan Felipe Criado Delgado.
  - c. Resultados obtenidos:

- i. Norma PN-84/B-06714/22: El objetivo de esta norma de origen polaca es el de realizar un primer ensayo de adhesión/desgaste del betún agregado al árido fraccionado en tres tamaños; depositándolos en una mezcla de agua hirviendo y sometiendo a series rodadas durante tiempos limitados para extraer el porcentaje de desprendimiento parcial de betún.
- ii. Norma UNE-EN 12697-11: Esta norma española fue aprobada y publicada oficialmente en Noviembre del 2012, como fruto de la sustitución de la norma UNE del 2007, siendo su finalidad la de determinar la afinidad entre árido y betún tras someterlo a una rotación uniforme durante tiempos limitados de la mezcla de árido y betún en agua a temperatura ambiente y un golpeteo constante de una varilla de vidrio en el interior de la botella de ensayo; extrayendo los áridos una vez golpeados a un recipiente con agua destilada y poder realizar una estimación visual del grado de recubrimiento del betún sobre las partículas del árido.
- iii. Norma UNE-EN 12697-12: Se puede decir que esta norma de junio del 2009— que fue el resultado de la modificación de la norma oficial de 2006— engloba tres métodos de ensayos diferentes en cuanto a las condiciones a las que se someten las muestras de material. El objetivo de los tres métodos es común, descubrir la sensibilidad al agua de varias probetas de mezcla bituminosa de manera indirecta; ya que el contacto entre dicho líquido (a diferentes temperaturas, según método empleado) y la mezcla bituminosa depositada en las probetas (con ciertas cantidades y condiciones de agua según método) no es de manera directa puesto que la probeta hace la función de separación de muestras, mostrando así la resistencia a tracción indirecta del betún y árido en contacto con las condiciones a las que se someten.

#### v. CONCLUSIONES

##### a. Homogenización de resultados

En definitiva, cada ensayo muestra una característica de vital importancia a la hora de emplear unas mezclas u otras, teniendo en cuenta las condiciones climáticas de la zona a emplear, las fuerzas a las que dicho material se va a someter, el objetivo global que debe tener la mezcla para la correcta finalidad del producto, etc.

Como conclusión, decir que estos ensayos tienen un objetivo común, el de evaluar la vulnerabilidad al agua de las mezclas bituminosas en caliente; yendo desde simples registros visuales de muestras sometidas a diferentes condiciones (normas PN-84/B-06714/22 y UNE-EN 12697-11) hasta métodos más elaborados que requieren de operativas y técnicas más especializadas (norma UNE-EN 12697-12).

Los ensayos más empleados en España son los ensayos sobre mezclas bituminosas compactadas, empleando la relación entre la fuerza a tracción indirecta (TSR). La metodología se basa en la relación a tracción indirecta entre probetas acondicionadas y sin acondicionar; cuyo resultado debe ser superior al estipulado en la norma para que dicha mezcla no sea susceptible al agua, por tanto, apta para su uso. Decir que el valor estipulado en la norma variará en función del tipo de mezcla bituminosa y la capa del firme al a que se someterá.

El mercado CE ha jugado un papel fundamental en estos ensayos, ya que como anteriormente se ha comentado, varias normas han sido anuladas y sustituidas por otras que cumplían los valores estipulados en dicho mercado, dando unos valores que reflejaban resultados más óptimos, adaptándose a las condiciones climáticas, corrosivas y ambientales que existen en la actualidad.

##### b. Conclusiones:

Los ensayos descritos anteriormente, además de mostrar la susceptibilidad al agua de las diferentes mezclas bituminosas sometidas a varias condiciones, también muestran qué tipo de árido es más apropiado tanto para dicho betún como para las diferentes condiciones a las que se va a someter. Otra conclusión que podemos sacar en cuanto a los ensayos descritos es la de ver cómo se comportaría la mezcla en función del tráfico al que estaría expuesta.



## 3 ESTADO DEL ARTE

---

*Sólo aquellos que tengan la paciencia de hacer perfectamente las cosas simples, adquirirán la habilidad de hacer las difíciles fácilmente.*

*- Friedrich Schiller -*

Inicialmente se partirá de los tipos y propiedades de las mezclas bituminosas, pasando por las teorías de la adhesión que se encargarán de determinar los parámetros clave para el presente estudio.

Posteriormente, la búsqueda de información se ha centrado en los ensayos que se emplean para la determinación de la adherencia entre árido-betún y en los daños más relevantes que son los producidos por el efecto del agua, ya que así es como indica el PG3 “ante cualquier circunstancia, se comprobará la adhesividad árido-betún mediante la caracterización de la acción del agua”.

Se hará mayor énfasis en los ensayos de laboratorio que se emplean en España y en Polonia, para así estudiar las diferencias entre ambos métodos de ensayo.

### 3.1 Hormigones Asfálticos (Mezclas Bituminosas)

Los aglomerados asfálticos o mezclas bituminosas, se definen técnicamente como la combinación de un ligante hidrocarbonado (betún o algunos de sus derivados), áridos y eventualmente aditivos, de forma que todas las partículas queden recubiertas por el ligante de forma homogénea.

El betún es un material tipo viscoelástico y los áridos son materiales de tipo elastoplásticos, considerándose, por tanto, a las mezclas bituminosas como un material viscoelastoplástico. (García Travé, 2012).

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, 2004).

Las principales ventajas que proporciona este tipo de mezclas es la regularidad superficial y las propiedades resistentes del firme.

#### 3.1.1 Composición

##### 3.1.1.1 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 (Kraemer, 2004).

En las capas de firme, de las que forman parte, aportan resistencia fundamentalmente resistencia, gracias la

componente de rozamiento interno; y las propiedades de los áridos van a depender de su granulometría, propiedades físicas y químicas.

Los áridos se pueden clasificar como:

A. BASADOS EN SU NATURALEZA (Blanco Ferrero):

- **ÁRIDOS NATURALES**, los cuales a su vez se pueden subdividir en dos grupos:
  - **ÁRIDOS GRANULARES (RODADOS)**, que son aquellos que se obtienen de yacimientos naturales (Areneros y graveras) y que se usan tras haber sufrido un LAVADO y una CLASIFICACION, es decir, se usan después de haber sufrido únicamente una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse a las especificaciones exigidas.
  - **ÁRIDOS DE MACHAQUEO**, que son aquellos que se producen en canteras tras arrancar los materiales de los macizos rocosos y someterlos posteriormente a una trituración, molienda y clasificación.
- **ÁRIDOS ARTIFICIALES**, que son aquellos que están constituidos por subproductos industriales, como son las escorias de la industria siderúrgica, las cenizas volantes procedentes de la combustión del carbón pulverizado en las centrales térmicas, estériles mineros, etc.
- **ÁRIDOS LIGEROS**, que son aquellos productos naturales o artificiales cuya densidad aparente es inferior a 1000 kg/m<sup>3</sup>. En la práctica la densidad aparente oscila entre 400 y 800 kg/m<sup>3</sup>. Se usan para la obtención de piezas o elementos de obra de bajo peso y/o aislantes.
- **ÁRIDOS RECICLADOS**, que son los procedentes de derribos de edificaciones (DEMOLICIONES), estructuras de firmes antiguos, etc. Estos constituyen, en cualquier ciudad importante, un volumen realmente grande y pueden ser empleados tanto para relleno en vías de comunicación, como incluso de materia prima para áridos de machaqueo.

B. BASADOS EN SU ORIGEN GEOLÓGICO (Bañón Blázquez, 2000):

Los tres tipos principales de roca se diferencian entre ellos por cómo se forman y son:

- Las rocas sedimentarias se forman a partir de partículas de arena, conchas, guijarros y otros fragmentos de material. Juntas, todas estas partículas se llaman sedimentos. Poco a poco, el sedimento se acumula en capas y durante un largo período de tiempo se endurece en roca. Generalmente, la roca sedimentaria es bastante blanda y puede romperse o desmenuzarse fácilmente. A menudo se puede ver arena, guijarros o piedras en la roca, y por lo general es el único tipo que contiene fósiles. Ejemplos de este tipo de roca incluyen conglomerado y piedra caliza.
- Las rocas metamórficas se forman bajo la superficie de la tierra a partir de la metamorfosis (cambio) que se produce debido al intenso calor y la presión (apretar). Las rocas que resultan de estos procesos a menudo tienen cristales brillantes, formados por minerales que crecen lentamente con el tiempo, en su superficie. Ejemplos de este tipo de roca incluyen gneis y mármol.
- Las rocas ígneas se forman cuando el magma (roca fundida profunda dentro de la tierra) se enfría y se endurece. A veces el magma se enfría dentro de la tierra, y otras veces entra en erupción en la superficie de los volcanes (en este caso, se llama lava). Cuando la lava se enfría muy rápidamente, no se forman cristales y la roca luce brillante y cristalina. A veces las burbujas de gas quedan atrapadas en la roca durante el proceso de enfriamiento, dejando pequeños agujeros y espacios en la roca. Ejemplos de este tipo de roca incluyen granito, andesita, basalto, etc.

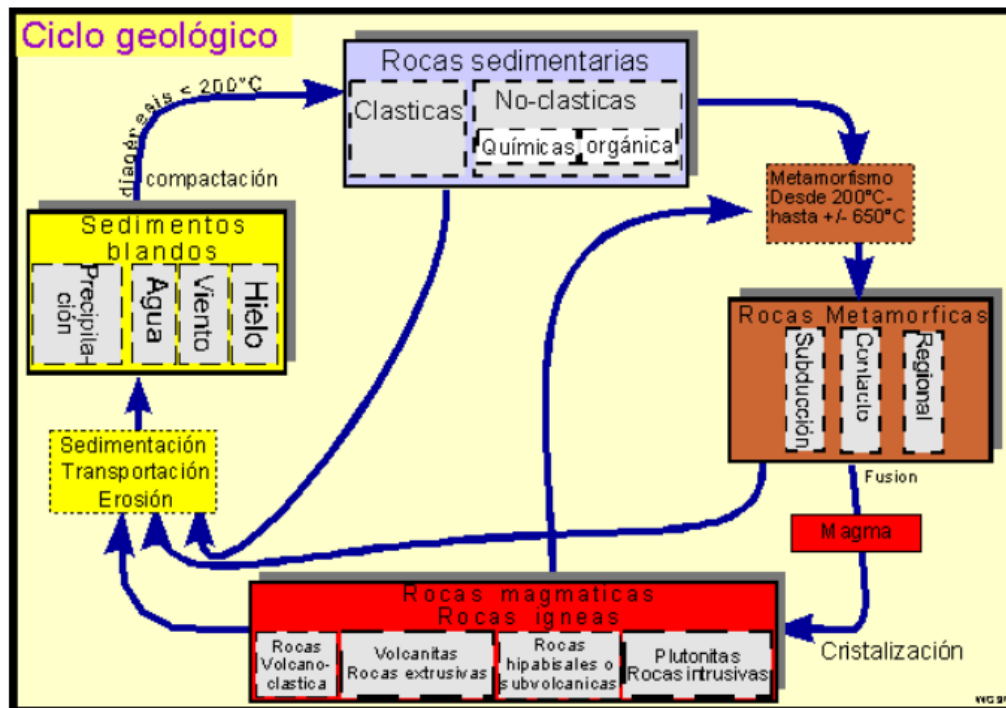


Figura 3-1. Ciclo geológico (Blanco Ferrero)

### C. BASADOS EN SU TAMAÑO (Hernández JL., 2001):

- Árido grueso: material retenido en el tamiz de 6.4 mm (Nº4).
- Árido fino: material que pasa el tamiz de 6.4 mm (Nº4). Ha de proceder de rocas de buena calidad, exigiéndole altos equivalentes de arena y una gran adhesividad.
- Filler: su denominación hace referencia al tipo de roca de la que proviene y consiste en polvo mineral. Dispone de una gran superficie específica, por lo que condiciona la cantidad de ligante a emplear en mezclas bituminosas.

#### 3.1.1.2 Ligantes Hidrocarbonados

Los ligantes hidrocarbonados son materiales aglomerantes, sólidos o líquidos (viscosos a temperatura ambiente), constituidos por mezclas complejas de hidrocarburos.

Los ligantes más empleados para la construcción de firmes de carreteras son los betunes asfálticos y sus derivados como son las emulsiones asfálticas.

Las propiedades más destacadas serían (Kraemer, 2004):

-La termoplasticidad, hace que al elevarse la temperatura se reduzca su consistencia. Al disminuir la temperatura el proceso es inverso hasta alcanzar una consistencia sólida con un módulo de rigidez cada vez mayor.

-El envejecimiento, por el que se entiende la alteración de las características iniciales del ligante con el paso del tiempo, como consecuencias de procesos de oxidación (por calentamiento del aire), radiación solar, acción del agua y del tráfico, etc. Se trata de un proceso en el que se producen tanto la pérdida de algunos de los componentes más ligeros de los ligantes como alteraciones en su estructura molecular.

Dentro de los ligantes hidrocarbonados se pueden diferenciar:

- Betunes asfálticos, son subproductos de las refinerías de petróleo y como se han comentado anteriormente, son los más empleados en la construcción de firmes de carreteras. Se les conoce también con el nombre de betunes de penetración. Consisten en un sistema coloidal tipo gel que a temperatura ambiente es sólido o semisólido, por lo que requiere un calentamiento previo.
- Betunes fluidificados, derivados de betún asfáltico, obtenidos mediante su disolución en aceite o fluidificante, cuyo efecto consiste en rebajar la viscosidad.
- Betunes fluxados, consisten en una variante de los betunes fluidificados 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 puro o algo fluidificado en agua. Son líquidos a temperatura ambiente y con una viscosidad reducida. Las emulsiones pueden ser aniónicas o catiónicas, según la polaridad que el emulgente proporcione a las partículas de betún.
- Ligantes modificados, son ligantes hidrocarbonados, a los que se le añade aditivos (los más empleados son los polímeros) con el objetivo de incrementar las características reológicas, mejorando así el comportamiento y la durabilidad de los tratamientos que lo utilizan.

### 3.1.2 Tipología de Mezclas

La clasificación de las mezclas bituminosas es distinta dependiendo de los criterios que se tomen para efectuarla, así quedaría según (Blázquez, 2000):

Clasificación de los aglomerados asfálticos		
Parámetro	Tipo de mezcla	Características
<b>ÁRIDO EMPLEADO</b> (ACUMULATIVA)	▪ Mástic	Filler + Betún
	▪ Mortero	Árido fino + Mástic
	▪ Macadam	Árido grueso + Betún
	▪ Hormigón	Árido grueso + Mortero
<b>TEMPERATURA</b> DE PUESTA EN OBRA	▪ En frío (MBF)	Temperatura ambiente
	▪ En caliente (MBC)	Altas temperaturas
<b>% DE HUECOS</b>	▪ Densas (D)	3 a 6%
	▪ Semidensas (S)	6 a 10%
	▪ Gruesas (G)	10 a 15%
	▪ Abiertas (A)	15 a 22%
	▪ Porosas (PA)	22 a 28%
<b>TAMAÑO</b> TEXTURA SUPERFICIAL	▪ Gruesas (gravas)	$T_{máx} > 8 \text{ mm}$
	▪ Finas (arenas)	$T_{máx} \leq 8 \text{ mm}$
<b>GRANULOMETRÍA</b> DE LOS ÁRIDOS	▪ Continuas	
	▪ Discontinuas	
<b>ESTRUCTURA</b> ESQUELETO MINERAL	▪ Sin esqueleto mineral	
	▪ Con esqueleto mineral	

Tabla 3-1. Clasificación de aglomerados asfálticos (Bañón Blázquez, 2000)



#### A. FRACCIONES DEL ÁRIDO EMPLEADAS:

Se puede establecer una clasificación acumulativa en función de los tipos de árido que se van incorporando, obteniendo así cuatro clases de mezclas (Viswanathan, 2005):

- Masilla bituminosa: formado por una mezcla de polvo mineral o filler y un ligante hidrocarbonado.
- Mortero bituminoso: a la composición de la masilla se le adiciona árido fino, es decir, arena de tamaño inferior a 8 mm.
- Macadam bituminoso: se obtiene mezclando árido grueso de granulometría uniforme (macadam) con un ligante.
- Hormigón bituminoso: es el empleado usualmente en la construcción de capas bituminosas. Se obtiene adicionando árido grueso al mortero, por lo que está formado por tres tipos de materiales: árido grueso (grava), árido fino (arena) y betún.

#### B. TEMPERATURA DE PUESTA EN OBRA

Existen, dos tipos de mezclas según su temperatura de puesta en obra:

- Mezclas bituminosas en frío (MBF): En ellas, el ligante suele ser una emulsión bituminosa –en algunos países se emplean betunes fluidificados–, de forma que la viscosidad es suficientemente baja como para no requerir un calentamiento previo a su puesta en obra.
- Mezclas bituminosas en caliente (MBC): En este caso, el ligante utilizado para su confección es el betún de penetración, por lo que se necesita reducir su viscosidad calentándolo en obra a temperaturas que oscilan entre los 150 y los 200°C. De este modo se logra una viscosidad suficientemente baja para obtener una mayor trabajabilidad y docilidad del material.

#### C. 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.

#### D. TAMAÑO MÁXIMO DEL ÁRIDO (Asphalt Handbook 7ª Edition)

En función del tamaño máximo del árido empleado cabe distinguir entre las siguientes mezclas:

- Mezclas de textura fina: En este tipo de mezclas, el tamaño máximo de sus áridos no excede de 8 mm. Destacan las lechadas bituminosas o slurrys ya estudiadas con anterioridad y los microaglomerados en frío y en caliente, todos ellos tratamientos superficiales empleados en la rehabilitación de vías de cierta importancia.
- Mezclas de textura gruesa: Constituyen la gran mayoría de los aglomerados tipificados en España, empleando tamaños máximos de árido normalizados de 8, 12, 20 y 25 mm. Son los que definen una mejor macrotextura del firme y determinan sus principales propiedades superficiales.

### E. SEGÚN LA GRANULOMETRÍA DE LOS ÁRIDOS

La distribución de tamaños en los áridos empleados condiciona las características de la mezcla bituminosa, estableciendo a su vez una división en dos grandes familias:

- Mezclas continuas: Existe una distribución escalonada de tamaños de árido, de forma que las partículas más finas rellenan los huecos dejados entre las más gruesas. Este tipo de granulometrías es típico de las mezclas cerradas, caracterizadas por un alto contenido en filler. Se emplean de forma generalizada en nuestro país.
- Mezclas discontinuas: Su granulometría es discontinua, faltando áridos de tamaños comprendidos entre 2 y 8 mm. Son mezclas relativamente impermeables, aunque con peor comportamiento plástico y más caras.

### F. SEGÚN LA ESTRUCTURA DEL ÁRIDO (Gawel I., 2001)

Según la estructura y ordenación interna que presentan las partículas se distinguen dos tipos de mezclas:

- Mezclas sin esqueleto mineral: Se trata de compuestos con un elevado contenido en filler y por consiguiente de betún, lo que hace que trabajen únicamente por cohesión al estar dispersos los áridos en el ligante, sin trabazón alguna.
- Mezclas con esqueleto mineral: Entre ellas se engloban los hormigones y morteros bituminosos, por lo que son las más empleadas en casi todos los países. Se adaptan a cualquier situación de carga y son más económicas que las anteriores, dado que su contenido en ligante es más reducido. Las mezclas normalizadas en España pertenecen exclusivamente a este grupo.

Tras la combinación de todos los criterios anteriormente expuestos, se exponen los tipos de mezclas más empleados en España (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 o drenantes: 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 esté 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.

### 3.1.3 Propiedades

Las características exigidas a cada componente que forme una mezcla bituminosa tienen como objetivo conseguir una serie de propiedades que hagan que dicha mezcla sea óptima para su uso. Para que prevalezcan las propiedades que interesan en cada caso, hay que considerar las cualidades de los materiales empleados, su dosificación y las condiciones de fabricación y de puesta en obra de la mezcla.

Para estudiar estas, se realizan diferentes ensayos de adherencia árido-betún, mediante la aplicación de solicitaciones de diversa magnitud con una frecuencia y velocidad determinadas; evaluando así su capacidad de adherencia y despegue entre áridos y ligantes empleados en dicha mezcla.

En este sentido, se puede afirmar que las mezclas bituminosas presentan un comportamiento visco-elasto-plástico: elástico para tiempos de aplicación de carga muy pequeños y temperaturas bajas (módulo de elasticidad constante), y viscoplástico para temperaturas y tiempos de aplicación elevados (Luis Bañón Blázquez, 2000).

A modo resumen, se puede decir que, en una mezcla bituminosa, hay que exigir las propiedades siguientes:

- Estabilidad
- Resistencia a la deformación plástica
- Resistencia a la fatiga
- Flexibilidad
- Resistencia al deslizamiento
- Impermeabilidad
- Durabilidad

#### A. ESTABILIDAD

Es la principal característica que se debe tener en cuenta en toda mezcla bituminosa, ya que esta debe soportar las cargas del tráfico y resistir las tensiones que se van a producir con unas deformaciones tolerables.

La estabilidad trata de representar la resistencia intrínseca del material, consistiendo en la suma de la resistencia mecánica producida por el rozamiento interno de los áridos y la producida por la cohesión que proporciona el ligante hidrocarbonado.

En laboratorio suele medirse dicho parámetro mediante el ensayo Marshall, NTL-159 (CEDEX, 2000<sup>a</sup>), para mezclas gruesas y mediante el ensayo de Hubbar-Field, NTL-160 (CEDEX, 1973).

#### B. RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA

Debido al comportamiento viscoelastoplástico de las mezclas bituminosas, estas tienden a presentar deformaciones plásticas ante fuertes aplicaciones de carga prolongadas en el tiempo, provocando la fluencia del material; roderas, deformaciones longitudinales producidas mayormente en las zonas de rodada de vehículos pesados.

Si la mezcla no tiene unas propiedades adecuadas, así como una relación filler-betún, una adecuada angulosidad del árido o una mala adherencia entre otras, pueden producirse acumulaciones de dichas deformaciones, generando baches de diversa consideración. (Ver figura 3-2)

Otras deformaciones plásticas que suelen ser usuales son las que se manifiestan mediante arrollamientos o resaltos transversales, comportándose el pavimento como si se tratara de una alfombra arrugada. Estas deformaciones se originan en zonas donde los esfuerzos horizontales son muy fuertes. (Ver figura 3-3)

El ensayo más común utilizado en España para determinar la resistencia a la deformación plástica es el ensayo de Pista de laboratorio (NLT-173).



Figura 3-2. Deformación plástica generada por mala dosificación de la mezcla



Figura 3-3. Deformación plástica generada por esfuerzos horizontales

### C. RESISTENCIA A LA FATIGA

En zonas donde se produce frecuentemente la acumulación de procesos de carga/descarga se genera una pérdida progresiva de elasticidad y resistencia; aumentando las deflexiones y produciéndose el agrietamiento del firme; fenómeno que se conoce como agotamiento del firme por fatiga.

La fisuración por fatiga es una de las principales patologías en los firmes de todo el mundo, siendo además una de las prioridades de investigación en el ámbito de la ingeniería de carreteras, y concretamente, en el diseño de mezclas bituminosas. En la actualidad existen diferentes tipos de ensayos que permiten la evaluación del comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas, pero a pesar de ello, casi ninguno de estos ensayos se emplea de forma generalizada. Debido a este hecho, no existe una referencia común para evaluar el comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas; por ello, existen una gran cantidad de investigaciones que pretenden encontrar un ensayo generalizado que pueda extrapolar los resultados obtenidos de varias muestras y entrelazarlos para llegar a hipótesis acertadas, como por ejemplo la tesis doctoral UGR-FACT: University of Granada Fatigue Asphalt Cracking Test.



Figura 3-4. Fisuración pavimento por fatiga, conocida como “piel de cocodrilo”

#### D. FLEXIBILIDAD

La flexibilidad de una mezcla bituminosa juega un papel de vital importancia si va a ser extendida en capas de espesores no superiores a 10cms o en firmes muy flexibles, ya que deben soportar constantes movimientos, de manera, que el conjunto de partículas que componen dicha mezcla debe tener un cierto grado de compactación entre ellas.

Este parámetro está muy ligado al anterior (fatiga), ya que para que una mezcla bituminosa sea flexible, su fatiga no debe ser prematura.

Para analizar esta propiedad, los ensayos que se realizan en laboratorio son ensayos donde la mezcla se somete a esfuerzos constantes de tracción y compresión, para ver el grado de fisuración que estas presentan frente tales fuerzas.

#### E. RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO

Cuando la mezcla va a utilizarse como capa de rodadura, esta debe presentar un elevado coeficiente de resistencia al deslizamiento. Para que esto ocurra, debe realizarse una selección y dosificación óptima de los áridos empleados en la mezcla: la macrotextura de la capa, la microtextura y la capacidad de eliminación de agua (áridos porosos y drenantes).

La macrotextura influye principalmente en la resistencia al deslizamiento en zonas que soportan velocidades elevadas; viniendo definida por el tamaño máximo del árido y la cantidad de mortero empleada. Dicho parámetro se mide in situ mediante la norma NLT-335/00: Medida de la macrotextura superficial de un pavimento por la técnica volumétrica.

La microtextura se debe a la textura superficial de los áridos gruesos y angulosos de la mezcla, midiéndose este factor en laboratorio mediante el coeficiente de pulimento acelerado, CPA.

Por último, la capacidad de eliminación de agua depende del porcentaje poroso que exista en la mezcla

y el árido, de manera que en laboratorio puedan realizarse ensayos de drenaje mediante el drenómetro.

#### F. IMPERMEABILIDAD

El mayor enemigo de un pavimento es el agua; ya que esta puede generar importantes alteraciones en su composición, afectando a sus propiedades y características.

Dicho esto, las mezclas bituminosas de las capas superiores de los pavimentos de carreteras, deben proteger la infraestructura frente a la acción del agua que cae sobre el firme. Para ello, las mezclas cerradas son las más impermeables, aunque, por otro lado, las drenantes canalizan el agua en su interior; suponiendo una solución alternativa siempre que se extiendan sobre otra capa que sí posea propiedades impermeabilizantes. (Luis Bañón Blázquez-Tomo 2).

La impermeabilización puede confiarse directamente a la capa de rodadura (capa superior) o bien a la capa intermedia, ejecutando sobre ella una capa que permita el paso del agua, formada por una mezcla drenante; de manera que el agua no quede acumulada en su interior y esta circule hasta buscar salida.

#### G. DURABILIDAD

Las capas de rodadura se ven sometidas a constantes agresiones externas generadas por los diferentes fenómenos meteorológicos, añadiendo a estos las propias cargas del tráfico que soportan, causando así deterioros en su textura y por consiguiente en su estructura interna. Es lo que se conoce como envejecimiento del firme.

Algunos de los deterioros que se originan son irreversibles y se ponen de manifiesto en forma de microfisuras y migraciones de ligantes, entre otras.

La durabilidad de las mezclas bituminosas está relacionada con un correcto diseño de la infraestructura y la adecuada fabricación y puesta en obra de la misma.

Al ser daños que no se pueden subsanar, ya que estos son causa del tiempo de vida útil que pueda tener el pavimento, las carreteras deben estar sometidas a mantenimientos periódicos.

En laboratorio se pueden realizar numerosos ensayos para evaluar la durabilidad de las mezclas, simulando diferentes fenómenos agresivos; sin embargo, cabe mencionar un novedoso ensayo de FÉNIX y EBADE, desarrollado por el Laboratorio de Caminos del Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio de la Universidad Politécnica de Catalunya.

### 3.1.4 Diseño de Mezclas Bituminosas en Caliente

Cuando hablamos del diseño de una mezcla bituminosa, nos referimos a la fase que sigue las pautas del proyecto de mezcla buscado; es decir, la fase donde se decide el tipo de mezcla que se va a crear, los materiales básicos como áridos y betún y el espesor de la capa más óptimo para las condiciones a las que se va a someter.

La dosificación abarca la caracterización y definición de los componentes de la mezcla, las proporciones de los distintos materiales usados, para obtener así la máxima estabilidad y durabilidad.

Por estabilidad se entiende la propiedad de la mezcla compactada que le permite soportar los esfuerzos que le impone el movimiento de la carga sobre ruedas sin sufrir una deformación considerable y permanente. Durabilidad es la propiedad de la mezcla compactada que le permite resistir los efectos perjudiciales del aire, agua y de los cambios de temperatura. Para que el pavimento sea satisfactorio, debe ser durable y estable durante toda su vida útil. (Paul H. Wright y Karen Dixon. Ingeniería de Carreteras).

En España, los métodos de proyecto y dosificación de mezclas bituminosas en caliente han sufrido constantes modificaciones y etapas. Inicialmente se empleaban los métodos descritos por el Instituto del Asfalto Norteamericano (Asphalt Institute, 2003) para hormigones bituminosos basados en el ensayo Marshall, el cual fue desarrollado por el ingeniero de carreteras del estado de Mississippi, USA, a finales de los años 30; Bruce Marshall.

Ya en el año 1943, este método fue modificado por el Cuerpo de Ingenieros de EEUU, provocando modificaciones en cuanto a los criterios de análisis de los resultados e introduciendo ensayos complementarios; convirtiéndose en el método más empleado en todo el mundo para la dosificación de mezclas.

El ensayo que se emplea en dicho método es el reflejado en la Norma NLT-159. “Resistencia a las deformaciones plásticas empleando el aparato Marshall” (CEDEX, 2000a). Este consiste en la ejecución de varias probetas cilíndricas de mezclas bituminosas, manteniendo la misma granulometría, pero diferenciándolas por el porcentaje de ligante empleado, variando sus cantidades en intervalos de 0,5%. Estas probetas se sumergen en agua a una temperatura de 60°C y posteriormente se golpean por varias caras, a una velocidad constante y se analizan las diferentes roturas que se generan en ellas, teniendo en cuenta la densidad, huecos en mezcla y huecos en áridos en las probetas compactadas y los resultados del ensayo mecánico a rotura de estabilidad y deformación Marshall; seguido de criterios adicionales como la relación filler/betún.

Como hemos mencionado, el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, completaron el método Marshall con ensayos complementarios como son 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, NTL-162 (CEDEX, 2000b).

Por otro lado, la serie de normas UNE-EN 13043 da categorías para un rango de otras propiedades agregadas. No todas las propiedades estipuladas deben cumplirse. Cada país miembro de la UE tiene su propia Guía Nacional, que brinda una guía sobre qué propiedades particulares se deben cumplir para los áridos utilizados en cada país miembro.

La cantidad de material de cantera en las mezclas de pavimentación de asfalto es generalmente de 90 a 95 por ciento en peso o de 75 a 85 por ciento en volumen. El árido es el principal responsable de la capacidad de soporte de carga del pavimento; en consecuencia, el rendimiento de una mezcla de asfalto en caliente (HMA) está muy influenciado por el árido. Los áridos se clasifican según su tamaño, geología y fuentes.

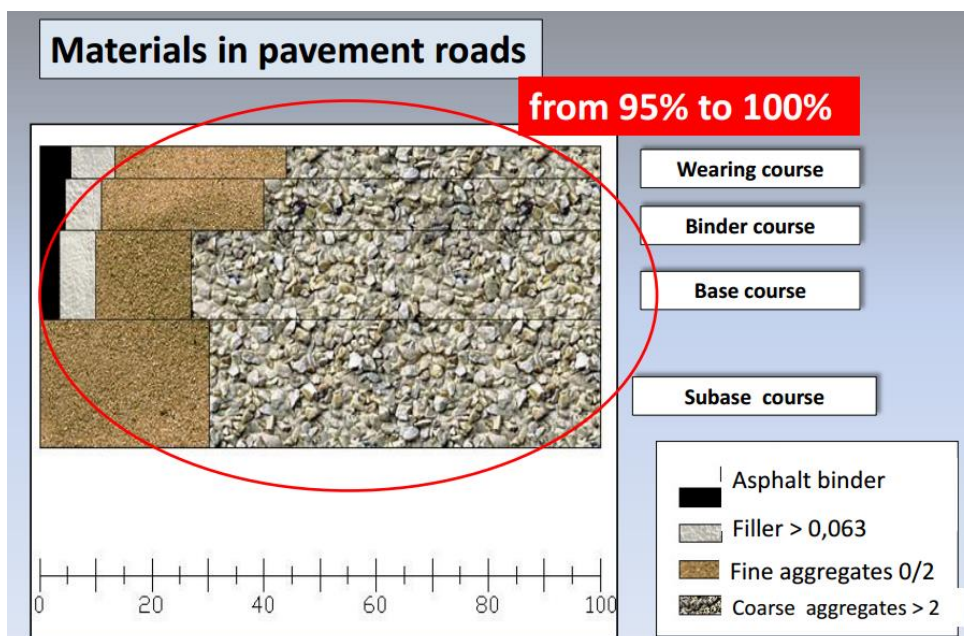


Figura 3-5. Materiales que componen una mezcla bituminosa

### 3.2 Mercado CE

El 1 de marzo del 2018, entró en vigor el llamado Mercado CE para la libre circulación de productos de construcción en el mercado interior de la Unión Europea.



Fue establecida por la Comunidad Europea y es el testimonio por parte del fabricante de que su producto cumple con una normativa o un documento de idoneidad técnica Europea (DITE), asegurando los aspectos relativos a seguridad, salubridad y protección del medioambiente requeridos por los Estados miembros de la Unión Europea.

Se debe tener presente que el marcado CE no implica la calidad del producto, sino que declara unas prestaciones de acuerdo con un formato determinado y, en ocasiones, cumple unos límites mínimos.

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

Esta documentación a aportar por parte del fabricante es:

- Garantizar el cumplimiento del producto con los requisitos esenciales de las Directivas de aplicación.
- Firmar la Declaración "CE" de conformidad.
- Elaborar la documentación o expediente técnico.
- Fijar el marcado "C.E."

Las diferentes etapas posibles por las que un producto ha de pasar desde su fabricación hasta su comercialización en el mercado son:



Figura 3-6. Etapas de un producto para recibir el marcado C.E.

Anteriormente, no se disponían de unos criterios comunes que normalizaran la fabricación de los diferentes tipos de mezclas asfálticas, generando controversias entre los diferentes estados miembros de la UE: por ello, surge la necesidad de armonizar criterios para la fabricación normalizada de las mezclas bituminosas por todos los países miembros.

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 como objetivo establecer las especificaciones de las mezclas asfálticas. En ella se encuentran los criterios básicos a exigir a los materiales empleados para su fabricación, recogidos mediante el ensayo de Tipo inicial y Control de producción en planta.

Estas normas recogen especificaciones para siete tipos de mezclas bituminosas calientes, como son: EN 13108-1, para hormigones asfálticos; EN 13108-2, para mezclas en capas delgadas; EN 13108-7, para mezclas drenantes; EN 13108-4, para laminados asfálticos en caliente; EN 13108-5, para masillas en piedras de asfalto; EN 13108-3, para “sofá asfáltico” y EN 13108-6, para masillas de asfalto.

Las tres primeras estas recogidas en los artículos 542 y 543 del PG-3, mientras que el resto no se utilizan en España, sino que son usadas habitualmente en Gran Bretaña, Alemania y Países Nórdicos.

La norma EN 13108-8 se emplea para los materiales bituminosos para reciclar, procedentes de pavimentos fresados o demoliciones de estos. En las normas EN 13108-20 y EN 13108-21 se contemplan los sistemas de evaluación de la conformidad de las mezclas; 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.

En cuanto a las series de normas EN-12697, se basan en recoger los métodos de ensayo para evaluar cada propiedad de las mezclas bituminosas. En ellas se describen 43 métodos de ensayo que han sido adaptados a los diferentes métodos de los países miembros; pudiendo en numerosos casos, emplear un tipo de ensayo u otro, lo que obliga a establecer unas condiciones normalizadas de fabricación de probetas y de procedimientos de ensayo.

Tanto el diseño, control y comportamiento en obra de las mezclas bituminosas en España, han 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, estas normas se modificaron y/o sustituyeron por las normas UNE, por el consenso generalizado por la Unión Europea y finalmente llegaron las normas UNE-EN.

El cambio de normativas conlleva al cambio de prescripciones técnicas de obligado cumplimiento, implicando a revisar los artículos 542 y 543 del PG-3 (Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes). El Mercado CE afecta exclusivamente a la fabricación de mezclas bituminosas y no a la puesta en obra de las mismas, no llegando a sustituir por completo los artículos anteriormente mencionados del PG-3. Por ello, las modificaciones o añadidos que generan estas nuevas normas son:

- Se mantienen las mezclas incluidas en la orden FOM/891/2004, pero cambiando las nomenclaturas por las especificadas en las normas europeas y expresando las propiedades de estas respecto a los nuevos ensayos exigidos (Ver tabla 3-2).

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 3-2. Designación mezclas bituminosas según normas europeas

Donde:

- AC: indica que la mezcla es de tipo hormigón bituminoso
- “Número”: tamaño máximo del árido.
- D, S, G y MAM: “D” para mezclas densas; “S” para mezclas semidensas; “G” para mezclas gruesas y “MAM” para mezclas de alto módulo.

- Los husos granulométricos se definirán con una serie de tamices diferentes, definidos en la norma UNA-EN 13043
- La norma 13108-1 que estudia la estabilidad y deformación del ensayo Marshall, solo se exige su aplicación en aeropuertos y no en carreteras; desapareciendo así las especificaciones reflejadas en el PG-3.
- Las propiedades establecidas como básicas que se debían evaluar en el diseño de las mezclas pasan a ser: el contenido de huecos (UNE-EN 12697-8), la sensibilidad al agua (UNE-EN 12697-12) y la resistencia a las deformaciones plásticas (UNE-EN 12697-22).
- Desaparece el ensayo de inmersión-compresión de la norma NLT-162 (CEDEX, 2000b) y el ensayo en pista de la norma 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”; cambiando la designación de las discontinuas (Ver Tabla 3-3).

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 3-3. Designación de mezclas bituminosas específicas para capa de rodadura según normas europeas

Donde:

- BBTM: es el grupo al que pertenecen, tipo discontinuo.
- “Número”: tamaño máximo del árido.
- A, B, C y D: es la clase a la que corresponde de las reflejadas en la norma europea.
- Las dosificación y composición de las fórmulas de trabajo son: El contenido de huecos (UNE-EN 12697-8), sensibilidad al agua (UNE-EN 12697-12) y la resistencia a la deformación plástica mediante el ensayo de rodadura (UNE-EN 12697-22)
- Las mezclas drenantes pasan a tener la siguiente nomenclatura

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

Donde:

- PA: indica que la mezcla es de tipo drenante
- D: es el tamaño máximo del árido.
- Ligante: es el tipo de ligante hidrocarbonado empleado en la mezcla.
- En el tipo de mezclas drenantes, las propiedades que se deben determinar para la dosificación y

composición de la mezcla son: el contenido de huecos (UNE-EN 12697-8), la sensibilidad al agua (UNE-EN 12697-12), la pérdida de partículas (UNE-EN 12697-17) y el escurrimiento del ligante (UNE-EN 12697-18).

Para concluir este punto, mencionar que todos los documentos normativos UNE fueron creados en los Comités Técnicos de Normalización (CTN) de la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), la cual se trata de una entidad dedicada al desarrollo de la normalización y la certificación (N+C) en todos los sectores industriales y de servicios.

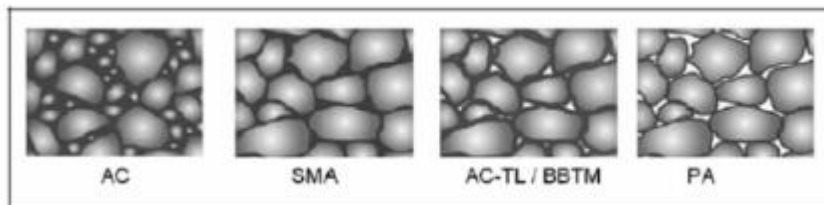


Figura 3-7. Tipos de mezclas bituminosas

### 3.2.1 Descripción resumen de la Normativa Europea

Con la publicación de la orden ministerial del 27 de diciembre del 1990, los artículos del PG3 que hacen referencia a nuestras emulsiones son el 213 y el 216. En el 2013 se recogía todo aquello relacionado con las emulsiones bituminosas convencionales, ya fueran aniónicas o catiónicas; y en el artículo 216 se recogía todo lo relativo a las emulsiones bituminosas pero esta vez modificadas con polímeros y también hacían referencia a los dos caracteres iónicos que disponemos. En el año 2005, se publicó la norma UNE-EN 13808 (Emulsiones bituminosas catiónicas). Las emulsiones aniónicas no se utilizan demasiado en Europa; por tanto, no han sido consideradas para propósitos de marcado CE.

Esta norma no es igual a nuestro PG-3, sino que es una norma abierta, es decir, no refleja las especificaciones que debe cumplir una emulsión, sino que es una norma abierta tipo menú, en la que se puede elegir qué tipo de clases queremos para una emulsión como por ejemplo una clase para el ligante de la mezcla, otra para el tiempo de fluencia, etc. Esto ha obligado a los países miembros de la Unión Europea a hacer un anexo nacional, donde se reflejan las adaptaciones de estas especificaciones; por tanto, cada país es libre de elegir qué tipo de mezcla es más apropiada para su territorio. De esta manera, el anexo nacional recoge ya la emulsión con esas especificaciones que tiene que cumplir.

El anexo de la publicación nacional se realizó en el año 2011 y paralelamente a este proceso se publicó la orden circular OC 29/2011, en el que se publicaban los antiguos artículos del PG-3 (213 Y 216), fusionándose en uno único, que es el 213, que recoge tanto las emulsiones bituminosas convencionales como a las emulsiones bituminosas modificadas, pero en este caso ya no se recogen las emulsiones bituminosas aniónicas.

De esta forma, nació el marcado CE, que es un requisito obligatorio para la libre circulación de productos por la Unión Europea; el cual, es responsabilidad del fabricante. Para las emulsiones bituminosas se comenzó a utilizar dicho marcado en el año 2010, y un año después comenzó a ser obligatorio a nivel europeo.

El marcado CE trajo consigo muchos cambios a la industria europea, los cuales quedan descritos en el apartado anterior.

El 1 de julio de 2013 entró en vigor el reglamento de productos de la construcción, por el cual, el ensayo inicial de clasificación de las mezclas bituminosas se denomina ensayo de tipo. También hizo cambiar los certificados de producción y la declaración de conformidad, la cual pasa a llamarse declaración de prestaciones, siendo esta de obligado cumplimiento por cada tipo de emulsión bituminosa y no por un grupo de productos como se obligaba anteriormente.

En diciembre del año 2013, se publicó una nueva versión de normas europeas de mezclas bituminosas catiónicas, cuyo cambio más significativo fue la sustitución de la norma UNE-EN 13808:2005 para especificaciones y la EN 14733:2006 para control de producción, por la UNE-EN 13808:2013, que refleja tanto las especificaciones como el control de producción de las mezclas bituminosas. Esto generó diferentes cambios como cambios en

las nomenclaturas, indicar si el betún es de origen vegetal o mineral; lo cual no es obligatorio, se amplían los rangos de rotura de las mezclas a la hora de su clasificación; disminuyendo así el número de clases de mezclas, reflejar en las nomenclaturas del producto el tipo de ensayo que se ha utilizado para plasmar sus propiedades o la ampliación de los rangos de tiempo de fluencia a 40°C; descendiendo así el número de solapes que estas experimentan, entre otros.

También se han generado cambios en el tipo de residuos de una mezcla bituminosa. Anteriormente existían los ligantes recuperados por evaporación, por estabilización y por envejecimiento; pero ahora, los ligantes de evaporación se dividen a su vez en dos tipos de residuos, en función de su durabilidad: los ligantes recuperados por evaporación + estabilización y los ligantes recuperados por evaporación + estabilización + envejecimiento.

Además de estos tipos de residuos, se han incluido el residuo de ligantes recuperados por destilación.

En cuanto a las mezclas bituminosas aniónicas no tenemos ninguna normativa europea que las amparen, sin embargo, estas se siguen utilizando para algunos tipos de áridos; por tanto, la Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (ATEB) ha creado una norma española en el año 2013 (UNE 51603) que recoge las especificaciones de estas emulsiones. (Contreras, Mayo, 2014)

### 3.2.2 Adaptación al PG-3

El 6 de febrero de 1976 se celebró una Orden del Ministerio de Obras Públicas, en la cual se aprobó el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales (PG-3/75), dando lugar al segundo texto completo de dicho Pliego, incluyendo las partes 1 y 8; complementando así el primer texto de febrero de 1965. Desde la aprobación de dicho Pliego del 76, este documento legal y de obligado cumplimiento para la Obra Pública, ha experimentado numerosas modificaciones de todos sus capítulos técnicos.

En la actualidad, los artículos vigentes de conglomerados hidráulicos y ligantes hidrocarbonados, fueron aprobados en su última actualización con la bendición de la Orden del Ministerio de Fomento, el 27 de diciembre de 1999, actualizándose así los artículos relacionados con conglomerados y ligantes de este tipo. Respecto al capítulo geotextiles perteneciente a esta parte, fue aprobado con la orden de Fomento FOM/1382/2002, en mayo del 2002, actualizando así los artículos relativos a la construcción de explanaciones, drenajes y cimentaciones.

Los artículos de la parte quinta del PG-3, que habla de Firmes y Pavimentos fueron aprobados en la Orden FOM/891/2004 del 1 de marzo, actualizándose y modificándose así los artículos referentes a dichos apartados.

Por último, la parte séptima del pliego, que engloba la Señalización, Balizamiento y Sistemas de Contención de Vehículos, fue aprobada con la Orden del Ministerio de Fomento de 28 de diciembre del 1999; dando lugar a importantes actualizaciones de los anticuados artículos.

Todos estos cambios han sido causados en gran parte por la adaptación del pliego a la normativa europea; ya que esta tenía como finalidad la sostenibilidad y el respeto al medio ambiente mediante la utilización de una serie de residuos, subproductos inertes y materiales reciclados; entre otros. Las modificaciones han generado numerosas experiencias sobre los materiales utilizados en la Red de Carreteras del Estado, originando una evolución tecnológica de dichos materiales y de sus sistemas constructivos de capa de firme y pavimentos y se han producido cambios en sus nomenclaturas.

A modo resumen, los criterios y prescripciones nuevas incluidas en este modificado PG-3 más importantes han sido (Orden FOM/2523/2014, de 12 de diciembre, PG3):

1. La adaptación a las nuevas nomenclaturas y ensayos de las normas armonizadas europeas.
2. La posibilidad de aplicación, dentro del marco de prescripciones de los betunes, de distintas innovaciones tecnológicas tendentes a la disminución de las temperaturas de fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas.
3. La incentivación del aprovechamiento de los materiales reciclados de los firmes y la inclusión de betunes con adición de polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso, por cuestiones de sostenibilidad ambiental.
4. El desarrollo de un nuevo ensayo de corte para la evaluación de la adherencia entre capas de firme y su empleo en los criterios de aceptación o rechazo, en orden a resaltar la importancia de la correcta ejecución de los riegos de adherencia en el comportamiento estructural de los firmes.

5. La necesidad de acentuar en el contexto actual, la importancia de los microaglomerados en frío en su función de rehabilitación superficial, para aportar una mejora de la macrotextura y de la resistencia al deslizamiento, así como por su idoneidad ante cuestiones relativas a la sostenibilidad y a la eficiencia. Además, se introduce la obligatoriedad de su compactación, para aumentar la cohesión inicial y garantizar la textura en las aplicaciones correspondientes a las categorías de tráfico más altas.
6. La mejora de calidad de los áridos, especialmente en las capas de rodadura, y el empleo de emulsiones modificadas, en una preocupación constante por la mejora de la seguridad vial y por la durabilidad de las superficies de rodadura. En este sentido aparece la posibilidad de reconocimiento económico por el empleo de áridos con un coeficiente de pulimento acelerado superior al exigido, así como por la mejora de la regularidad superficial respecto a la especificada.
7. La conveniencia de aumentar la durabilidad y niveles de retroreflexión de la señalización horizontal y vertical.
8. La inclusión a través de su normalización de los sistemas de protección de motociclistas.

Es de vital importancia destacar que otro factor que ha sido clave para estas modificaciones fue la entrada en vigor del marcado CE, el cual fue el motor de los cambios de nomenclaturas de los productos. Este marcado y a su vez, el actual PG-3, tuvieron como objetivo el de establecer condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción a todos los países integrantes de la Unión Europea; todo ello en virtud de lo dispuesto en el Reglamento número 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo de 9 marzo del 2011; derogando la Directiva 89/106/CEE del Consejo. En dicho reglamento se establece que al final del periodo de coexistencias de las normas armonizadas, todos los Estados Miembros de la Unión Europea están obligados a anular todas las disposiciones nacionales contradictorias con el concepto de armonización.

### 3.3 Teorías de la Adhesión en Mezclas

Es bien sabido que la adhesión en la interfaz entre el betún y el árido es una de las principales propiedades funcionales para garantizar la durabilidad de las mezclas de asfalto caliente, pero la adhesión puede reducirse y la cohesión dentro del asfalto se pierde a través de la presencia de agua en la interfaz betún / piedra. Este fenómeno se conoce como "despojar".

Se sabe por experiencia y por experimentos que algunos áridos poseen características que permiten una muy buena adhesión y otros tipos de piedra muestran una mala adherencia. Además, la adhesión también se ve afectada por las propiedades del árido mineral que tiene un efecto dominante en comparación con el origen del betún. Por otro lado, la resistencia reducida contra la separación de un determinado árido se puede mejorar agregando cal hidratada (o relleno que contiene cal hidratada) a las mezclas de asfalto. El uso de aditivos en el betún también puede mejorar la adherencia, pero funciona en general de forma más selectiva y depende de la combinación de árido/ betún.

Las propiedades del betún también afectan la adherencia; sin embargo, se sabe que el origen y las propiedades del árido mineral tienen un efecto dominante en comparación con el origen del betún. La adhesión insuficiente hace que el asfalto se retire de la superficie del árido, lo que en última instancia puede generar daños en el pavimento.

Las interacciones betún-áridos están fuertemente influenciadas por la composición y la química de la superficie del árido. Las propiedades de los áridos son mucho más influyentes en la determinación de la adsorción y el comportamiento de división de la mezcla que las propiedades del betún. Las pruebas de adsorción que describen las grandes diferencias en la afinidad del asfalto y la propensión al desmonte ocurren entre los áridos de diferentes mineralogías. Los compuestos de asfalto con grupos funcionales polares son altamente competitivos para los sitios activos en la superficie del árido.

Los cambios en el pH - particularmente un pH muy básico - pueden ser perjudiciales para el enlace entre el betún y el árido. La teoría afirma que las mezclas asfálticas con películas finas de asfalto fallan en la tensión debido a la ruptura de la unión adhesiva, mientras que aquellas con películas asfálticas más gruesas (o películas de masilla) fallan debido al daño dentro de la masilla (falla cohesiva) en oposición al desprendimiento interfacial.

Hay efectos negativos de la humedad, que influyen en el rendimiento de la mezcla de asfalto. Si no hay agua,

prácticamente no hay problema de adherencia de la construcción bituminosa. El problema de adherencia ocurre cuando el árido está húmedo, frío, cubierto de polvo o arcilla.

La tensión superficial en la superficie del ligante. El líquido tiende a reducir su superficie y se caracteriza por el deseo de lograr un ligante de una esfera. Este fenómeno depende de la naturaleza y temperatura del líquido. Con el aumento de la temperatura del aglutinante, la viscosidad disminuye, causando una reducción en la tensión superficial del betún y el árido, mientras, aumenta la adhesión.

El aumento de la temperatura hace que disminuya la cohesión y la adhesión de las partículas de asfalto, mientras que la humectabilidad mejora y la capacidad de unión del aglutinante se deteriora. Bajar la temperatura provoca el fenómeno contrario. La cohesión y la tensión superficial aumentan, mientras que producen un aumento en la unión como consecuencia de que el asfalto afecta negativamente el proceso de humedecimiento. La medida de la humectabilidad del ángulo de contacto está muy bien caracterizada por la capacidad de humedecimiento en el borde del betún de contacto, el árido y el agua. En el caso de que el ángulo de contacto  $\Theta > 90^\circ$  (Figura 3-7) sea pobre, mientras que cuando el ángulo de contacto  $\Theta < 90^\circ$  (Figura 3-8), esta capacidad es buena. Para que el betún se adhiera mejor al árido, debe perseguirse hasta el ángulo  $\Theta$  lo más cerca posible del cero, porque entonces tenemos que lidiar con el fenómeno de la perfecta humectación. Cuando se produce el ángulo de contacto  $\Theta = 180^\circ$ , la carga agregada a la piedra empuja el asfalto. Este fenómeno ocurre en el caso de áridos ácidos.

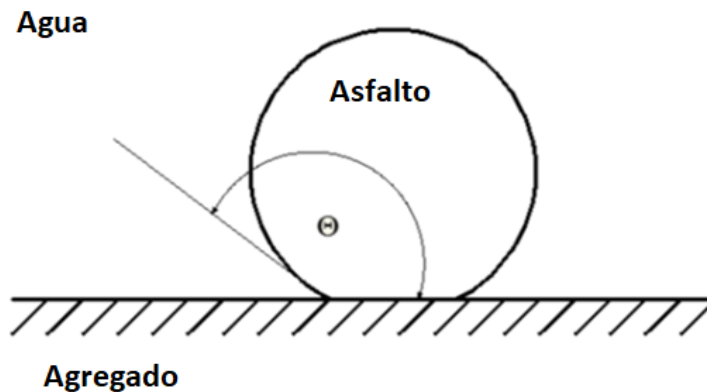


Figura 3-8. El sistema de betún-agua-árido en el ángulo  $\Theta > 90^\circ$  (AASHTO. (D4867, 2014))

El proceso de "humedecimiento" del árido asfáltico se ejecuta en paralelo con el proceso de adsorción y quimisorción. La adsorción es un proceso de unión de partículas de dos sustancias en el límite de contacto de dos fases. Es un proceso proporcional a la actividad superficial del árido. Por lo tanto, como primer surfactante, adsorbe los componentes del betún (asfaltos).

El número de adsorción también depende de la estructura de las moléculas adsorbidas del material. Durante este proceso, las moléculas de sustancias tensioactivas están dispuestas de tal manera que reducen el exceso de energía libre de superficie del material mineral. Sobre la superficie del adsorbente (tamaño granular) se deposita en la parte polar de la molécula, mientras que la porción de hidrocarburo (hidrófoba) está en el asfalto.

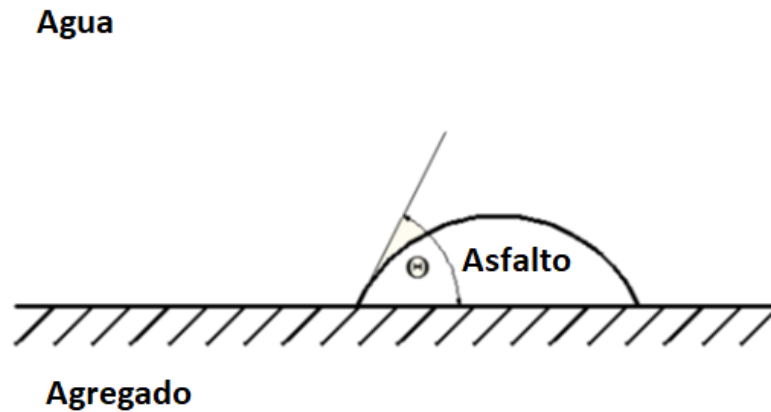


Figura 3-9. El sistema de betún-agua-árido en el valor de ángulo deseado  $\Theta < 90^\circ$  (AASHTO (D4867, 2014))

Igualmente es de importancia el proceso de quimisorción; el cual, no siempre continúa con la misma intensidad. La composición de asfalto de los componentes activos se puede dividir en un tipo aniónico y, por lo tanto, la quimisorción será activa en la superficie de la base mineral (con una gran cantidad de carbonato de calcio,  $\text{CaCO}_3$ ) o caliza y dolomita. En el caso de áridos ácidos (que contienen una gran cantidad de sílice,  $\text{SiO}_2$ ), los procesos de quimisorción son insignificantes, mientras que el fenómeno de la adsorción física ocurre asociado con la influencia de las fuerzas intermoleculares.

La absorción es otro proceso importante en la formación de un revestimiento de los áridos. Materiales minerales caracterizados por la presencia de huecos (poros) que, durante la mezcla del asfalto con el árido, pueden rellenarse con adhesivo. El betún se adhiere mucho mejor a los granos porosos, absorbiéndolo, en lugar de a los áridos de superficie lisa. Los compuestos orgánicos de asfalto de áridos de bajo peso molecular penetran en los poros, mientras que los de mayor peso molecular permanecen en la superficie del grano. En última instancia, se manifiesta en un aumento de las propiedades mecánicas de la capa de asfalto en la superficie del mineral. El fenómeno de la absorción se encuentra, entre otros, en el caso de la piedra caliza porosa.

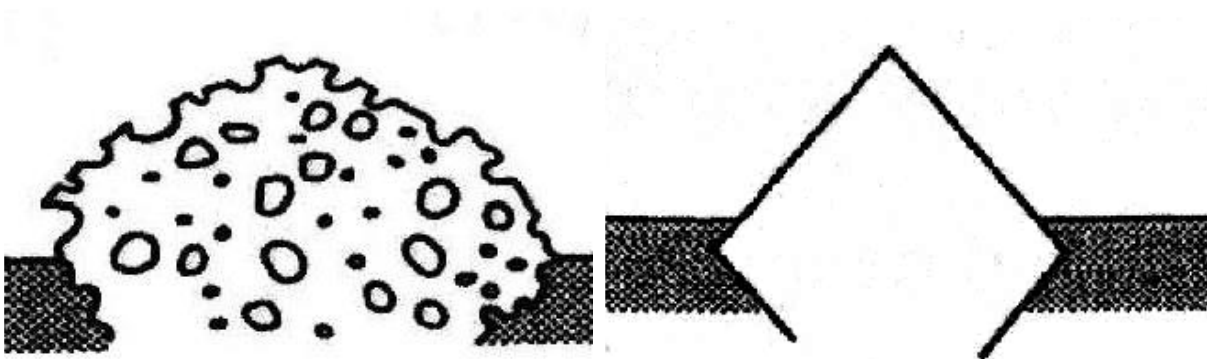


Figura 3-10. ido poroso (Ej. Escoria de acero) y no poroso (Ej. Caliza)

Existen varias teorías para la adhesión. Algunas teorías combinan elementos de otras teorías y otras usan los mismos elementos, pero la definen de manera diferente como un todo.

Existen cuatro teorías principales diferentes para la adhesión de áridos bituminosos que son: la teoría de la reacción química, la teoría de la orientación molecular, la teoría mecánica y el enfoque termodinámico.



### 3.3.1 Teoría Sobre las Reacciones Químicas

Esta teoría se basa en la suposición de que la adhesión entre el betún y el árido es causada por reacciones químicas. Después de recubrir el árido con betún, tiene lugar la adsorción de los componentes activos químicos del betún en la superficie del árido. Los componentes químicos activos tanto del betún como del árido interactúan, lo que resulta en transferencias de electrones entre los componentes activos en el betún y el árido y entre los componentes activos en el mismo betún. Las transferencias de electrones son causadas por la diferencia de potenciales. Cuando interactúan diferentes componentes activos, algunos componentes tendrán la tendencia de donar electrones y otros los recibirán. El betún consta de ambos componentes activos de tipo, por lo tanto, de componentes, que tendrán la tendencia a donar electrones rápidamente y componentes, que reciben electrones rápidamente. (Bagampadde, 2005)

También los áridos de carbonato consisten en componentes activos de donante y aceptor fáciles. Por otro lado, los áridos de cuarzo consisten predominantemente en componentes, que actuarán principalmente como receptores de electrones.

La teoría continúa señalando que se desarrollan enlaces adhesivos más fuertes en las capas de interfaz en las que se obtiene un equilibrio adecuado entre la donación y la recepción de componentes activos tanto del betún como del árido existente.

### 3.3.2 Teoría de la Orientación Molecular

En esta teoría, los grupos funcionales tanto del betún como del árido causan una unión adhesiva. Los grupos funcionales de betún migran y apuntan hacia la superficie del árido, como resultado del campo eléctrico causado por las cargas de dipolos de los grupos funcionales sobre la superficie del árido. Los grupos funcionales de betún se alinean de acuerdo con el campo eléctrico alrededor del árido.

El nivel de adsorción y desorción de los grupos funcionales de betún está influenciado por la distancia de la partícula y la magnitud de las cargas del dipolo. A distancias cercanas de la superficie del árido, el grupo funcional de betún con el mayor potencial formará una capa. El potencial de la superficie del árido disminuye a lo largo de una distancia de crecimiento de esta superficie, lo que hace que los grupos funcionales de betún con carga inferior formen una capa unida menos firme alrededor de la primera capa de grupos funcionales de betún.

La capa con el enlace más fuerte se llama la capa de popa y la capa secundaria se llama la capa de Gouy-Chapman. La unión adhesiva causada por la unión electrostática y por hidrógeno se reduce cuando el agua está presente en la capa de interacción. El agua es más polar que la mayoría de los grupos funcionales y moléculas de betún. Por lo tanto, existe una preferencia de la superficie del árido para el agua por encima del betún. Esto proporciona una posible explicación para el desmonte.

### 3.3.3 Teoría Mecánica

El supuesto principal de esta teoría es que, durante el recubrimiento del árido, el betún ingresa a los poros, agujeros, grietas e irregularidades presentes en la textura de la superficie del árido. Después del endurecimiento del betún, la unión adhesiva es causada por la fricción de la superficie entre el betún y la superficie del árido.

La teoría puede proporcionar una explicación para los enlaces adhesivos más fuertes de texturas de superficie de áridos más rugosos. En primer lugar, más irregularidades proporcionan más interbloqueo para el betún. En segundo lugar, una superficie de árido más áspera tiene un área física de contacto más grande y, por lo tanto, proporciona una mayor fricción de superficie entre el betún y la superficie del árido.

Debido a la rugosidad de la superficie del árido, las tensiones en el recubrimiento de betún se redistribuyen mejor. Esto resulta en menos concentraciones máximas de estrés y por lo tanto una disminución en la posibilidad de ruptura. Sin embargo, la teoría también establece que, con un aumento de la rugosidad de la superficie del árido, la humectación con betún se vuelve más difícil y, por tanto, podría quedar incompleta. Esto puede generar una unión adhesiva menos fuerte.

### 3.3.4 Enfoque Termodinámico

Este enfoque para la resistencia de la unión adhesiva entre el betún y el árido se basa en el cambio de la energía superficial del betún después de recubrir el árido. Combina elementos de la reacción química y la teoría de la orientación molecular.

Después de impregnar el árido con betún, las fuerzas intermoleculares en la superficie del árido y el betún interactúan, dando como resultado una energía de unión liberada. El estado de energía inicial y final total de un sistema se denomina energía de Gibbs y la liberación de la energía de enlace da como resultado un cambio de esta. La ruptura del enlace entre la superficie del árido y la energía bituminosa nos da como resultado la adhesión del betún en la superficie del árido.

### 3.3.5 Observaciones sobre las Teorías de Adhesión

Hasta ahora no es posible afirmar que una de las teorías sea errónea o que una teoría describa todo el proceso de adhesión de áridos bituminosos. En general, se piensa que los fenómenos de adhesión son una combinación de las cuatro teorías de adhesión árido-betún. Por lo tanto, la adhesión debe explicarse por todos los elementos mencionados en las cuatro teorías de adhesión.

Otra clasificación que se puede hacer más simple acerca de la adherencia es (ASEFMA (Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas), s.f.):

- Activo: el betún tratado como un promotor de adhesión activo que desplaza la humedad de una superficie y establece un enlace entre la superficie mineral y el betún.
- Dinámico: La adhesión entre el árido mineral y el betún es resistente al efecto de bombeo de los vehículos en las capas superficiales húmedas.
- Pasivo: La capacidad de una unión establecida entre la superficie mineral y el betún para resistir el efecto del agua.

## 3.4 Factores que Afectan a la Adhesión en Hormigones Asfálticos

Muchos de los deterioros que surgen en las carreteras están causados por una mala dosificación, por falta de calidad de los materiales utilizados y por una inadecuada puesta en obra. Dos aspectos importantes que influyen en gran medida en el comportamiento mecánico y durabilidad de una mezcla bituminosa son la calidad del polvo mineral y la adherencia entre sus elementos.

Pueden ser numerosos factores los que afecten a la adhesividad de los hormigones asfálticos, ya que estos son el resultado de la mezcla de varios elementos unitarios, árido y betún; los cuales, a su vez, presentan propiedades y características individuales.

Según las características físicas de estos elementos, la mezcla reacciona de una forma u otra, enriqueciendo o empobreciendo algunas propiedades y mejorando o empeorando algunas características finales de la mezcla.

Dichas propiedades finales también están íntimamente relacionadas con el proceso químico que experimenta dicha composición tras la mezcla de estos elementos, en función de las propiedades de los elementos básicos de ella.

Por último, las mezclas bituminosas son afectadas por fenómenos externos a su composición como son las cargas a las que van a ser sometidas o fenómenos meteorológicos o medioambientales que van a soportar a lo largo de su vida útil.

En la figura 3-10. esquematizamos los diferentes factores que influyen en la propiedad de adhesión de los hormigones asfálticos:

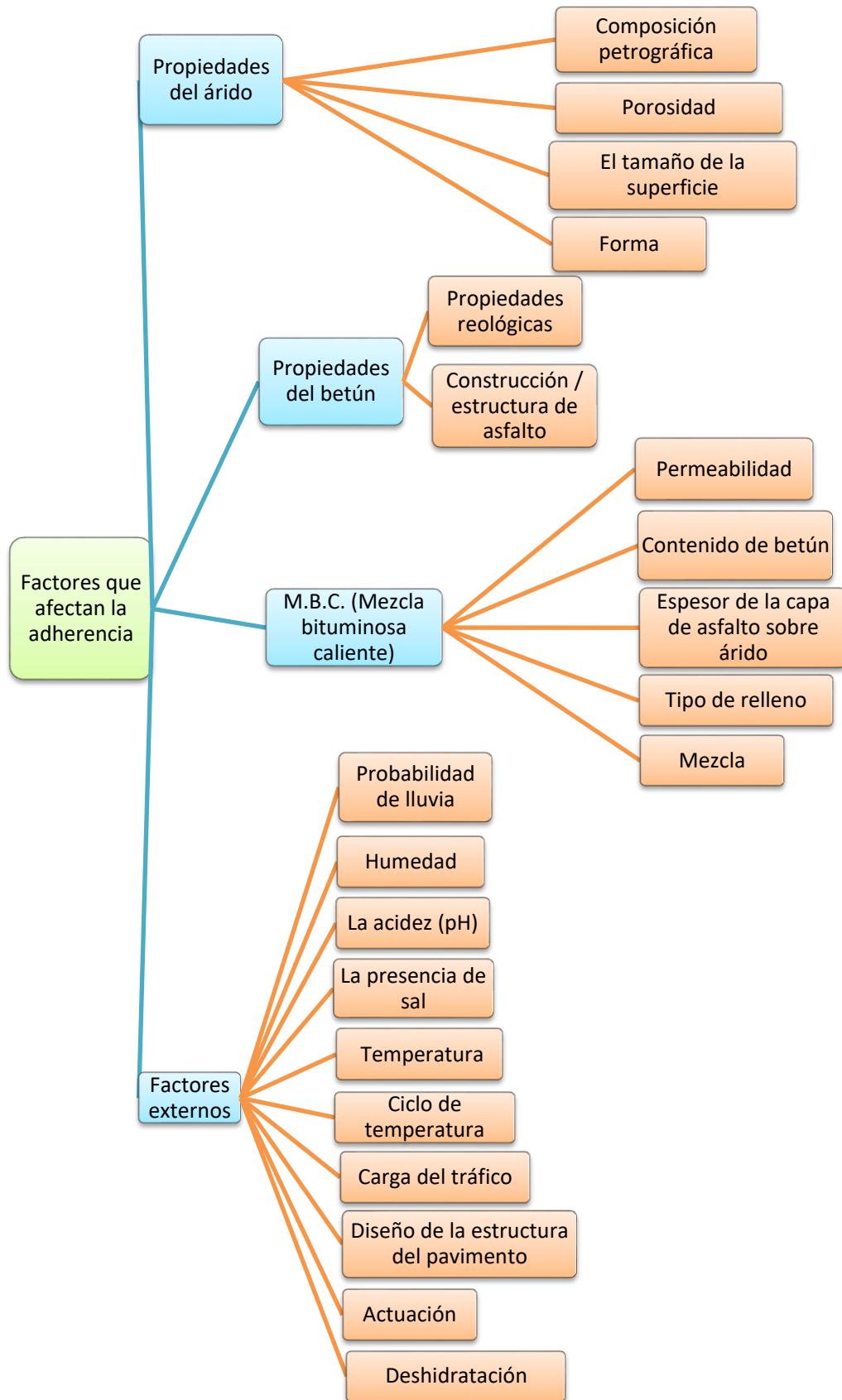


Figura 3-11. Esquema/resumen de los factores que afectan a la adherencia de los hormigones asfálticos

### 3.4.1 Propiedades de los Betunes

Se definen como betunes asfálticos a los ligantes hidrocarbonados sólidos o viscosos, de alta densidad, preparados a partir de hidrocarburos naturales por destilación, oxigenación o "cracking"; que contienen una baja proporción de productos volátiles, poseen propiedades aglomerantes características, y son esencialmente solubles en sulfuro de carbono.

Este componente es el que aglomera y da cohesión en las mezclas bituminosas y es el principal responsable de las propiedades de estas. Gracias a sus propiedades principales, los betunes pueden ser fácilmente manipulables, aplicando mayor o menor temperatura, mejorando así su adherencia con los áridos a mezclar y la compactación de las mezclas resultantes de dicho proceso.

Además, pueden presentarse en diferentes estados: gaseoso, líquido, semisólido y sólidos.

Se sabe por experiencia y por experimentos que algunos betunes poseen características que permiten una muy buena adhesión y otros tipos de una mala adhesión. Los factores más importantes en los betunes son la energía superficial y la viscosidad, los cuales describiremos en apartados posteriores. (CEPSA BETUNES, s.f.)

CARACTERÍSTICAS		UNE EN	UNIDAD	15/25 <sup>(1)</sup>	35/50	50/70	70/100	160/220
Penetración a 25°C		1426	0,1 mm	15-25	35-50	50-70	70-100	160-220
Punto de Reblandecimiento		1427	°C	60-76	50-58	46-54	43-51	35-43
Resistencia al envejecimiento UNE EN 12607-1	Cambio de masa	12607-1	%	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,8	≤ 1,0
	Penetración retenida	1426	%	≥ 55	≥ 53	≥ 50	≥ 46	≥ 37
	Incremento del Punto de Reblandecimiento	1427	°C	≤ 10	≤ 11	≤ 11	≤ 11	≤ 12
Índice de Penetración		12591 13924 Anexo A	-	De -1,5 a +0,7	De -1,5 a +0,7	De -1,5 a +0,7	De -1,5 a +0,7	De -1,5 a +0,7
Punto de fragilidad Fraass		12593	°C	TBR	≤ -5	≤ -8	≤ -10	≤ -15
Punto de inflamación en vaso abierto		ISO 2592	°C	≥ 245	≥ 240	≥ 230	≥ 230	≥ 220
Solubilidad		12592	%	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0

Figura 3-12, Características tipos betunes

#### 3.4.1.1 Constitución del Betún

Como anteriormente hemos definido, el betún (también conocido como bitumen) es una mezcla de sustancias orgánicas que se encuentran en la naturaleza, compuestas principalmente de carbono e hidrógeno, muy viscosas, con una elevada densidad, completamente solubles en disulfuro de carbono y compuesta principalmente por hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Además de sus principales componentes químicos (carbono e hidrógeno), la mayoría de los betunes contienen azufre y varios elementos metálicos como son el níquel, plomo, cromo, mercurio, vanadio, arsénico, selenio y otros elementos de naturaleza tóxica.

Los betunes pueden lograr una buena conservación de plantas y animales, que forman fósiles en las rocas. El betún también se halla en los meteoritos, rocas arcaicas, mineralizaciones de cobre y zinc, y en cuevas. Es posible que el betún sea el principal material formado durante la acreción - término que se utiliza para nombrar el crecimiento de un cuerpo por agregación de cuerpos menores - de la tierra y fuera procesado por las bacterias que consumen hidrocarburos.

Con el paso del tiempo, la creación de los betunes asfálticos ha pasado de ser un proceso natural a convertirse en un proceso artificial, mejorando así las propiedades y características de estos; obligándolos a cumplir con las condiciones que se les deben superponer para cumplir con las exigencias requeridas en el producto final, las mezclas bituminosas.

### 3.4.1.2 Tensión Superficial

Directamente relacionada con la composición química es la energía superficial del betún. Las fuerzas intermoleculares en la superficie del betún son capaces de interactuar con las moléculas del árido dando como resultado un enlace adhesivo.

En términos generales cada molécula de un líquido está rodeada por otras: la atracción en todas direcciones se compensa en cada punto, excepto en la superficie, donde la resultante es una atracción neta hacia el interior. El líquido tiende a cohesionarse y a minimizar su superficie. La superficie se comporta como una película que ofrece resistencia a su deformación y por tanto a romperse.

Por ello, la tensión superficial es la fuerza por unidad de longitud que ejerce una superficie de un líquido sobre una línea cualquiera situada sobre ella. La fuerza debida a la tensión superficial es perpendicular a la línea y tangente a la superficie.

También se puede decir que la tensión superficial es la energía por unidad de área que se necesita para aumentar una superficie.

### 3.4.1.3 Viscosidad

La viscosidad es una medida de la resistencia de los líquidos a fluir. Se define como la resistencia que oponen las partículas a separarse, debido a los rozamientos internos que ocurren en el seno del fluido y esta oposición es debida a las fuerzas de adherencia que tienen unas moléculas de un líquido o fluido con respecto a las otras moléculas del mismo líquido. Se da en la unidad de  $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$ .

Los dos factores más importantes que hacen variar la viscosidad de un fluido son la temperatura y la presión, siendo este último menos influyente. Durante la mezcla betún-árido, el betún debe tener una viscosidad lo suficientemente baja para lograr el recubrimiento y la absorción óptima sobre los áridos. Esto se establece aumentando la temperatura.

Es importante mencionar que la viscosidad es una propiedad de los líquidos que está presente siempre y cuando estos estén en movimiento, ya que, un líquido que se encuentre estático hace que sus moléculas se mantengan fijas, no teniendo la necesidad de interactuar entre sí para tratar de permanecer unidas. Por todo ello, el estudio de esta propiedad se puede analizar siempre y cuando se aplique una fuerza (Ley de Viscosidad de Newton).

Como conclusión, se puede decir que mientras más grandes sean las moléculas del betún, mayor será la resistencia que este opondrá al movimiento generado tras aplicar una fuerza externa y por ello, podemos afirmar que el betún es más viscoso y su desplazamiento será más lento. El hecho de que un betún sea más viscoso que otro, quiere decir que tiene una mayor resistencia a su deformación; por tanto, favorece algunas características de la mezcla bituminosa como es la durabilidad. (REPSOL PRODUCTOS, s.f.)

## 3.4.2 Propiedades de los Áridos

Como ya hemos definido en apartados anteriores, los áridos son un material granular de origen natural o artificial, que forma el esqueleto mineral de las mezclas bituminosas. Este componente representa entre el 80% y 90% del peso de dicha mezcla.

La finalidad de utilizar áridos en dicha composición son la de aportar resistencia como esqueleto y proporcionando durabilidad.

Además, disminuye la retracción que se produce en el betún al someterlo al mezclado con el árido, teniendo una gran importancia el tamaño de sus particulares y el contenido de finos.

También se puede mencionar que, gracias al árido, se puede abaratar el coste de la mezcla bituminosa, ya que este material es más económico en comparación con el fluido viscoso.

En función de sus características, estas hacen que la mezcla bituminosa sea más o menos adhesiva, cuyos factores

más importantes de estos son la composición mineralógica, la composición química, la energía de la superficie, la intemperie, la textura de la superficie, el tamaño, la forma y la angularidad, la porosidad y la distribución del tamaño de los poros, así como las impurezas de la superficie del mismo. (Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes (PG3), Materiales básicos, Diciembre, 2014)

#### **3.4.2.1 Composición Mineralógica**

La composición mineralógica afecta a la textura de la superficie del árido. Muchos minerales muestran diferentes tipos de textura cuando se fracturan. El cuarzo, por ejemplo, tiene una fractura concoidal. Esta fractura tiene la apariencia de series o arcos. Metales nativos como el cobre tienen una fractura pirateada. Otros tipos de fracturas son fracturas uniformes y desiguales. Por tanto, se puede decir que la composición mineralógica es uno de los principales factores que afectan el desmonte.

La composición mineralógica de los áridos depende del origen de las rocas. En la tierra, las rocas se pueden dividir en tres grupos principales: rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Las rocas ígneas tienen su origen principal en las rocas fundidas dentro de la corteza terrestre, llamadas magma. Las rocas sedimentarias se forman por la acumulación de productos de erosión y desgaste de las rocas desmenuzadas y descompuestas. El último grupo, la roca metamórfica, contiene rocas ígneas y sedimentarias, que se han conversado drásticamente, de modo que la naturaleza y el estado original de las rocas se pierden. (Blanco Ferrero)

#### **3.4.2.2 Composición Química**

El nivel de acidez de los áridos tiene una fuerte influencia en las reacciones químicas en la interfaz. Se ha encontrado que la presencia de algunos componentes metálicos en la superficie del árido podría ser beneficiosa para la adhesión y la presencia de algunos componentes metálicos podría ser perjudicial. El hierro, el calcio, el magnesio y hasta cierto punto, el aluminio en la superficie del árido a veces es beneficioso.

#### **3.4.2.3 Energía de Superficie**

Directamente relacionada con la composición química y mineralógica es la energía superficial de los áridos. Las fuerzas intermoleculares en la superficie de los áridos pueden interactuar con las moléculas del betún, dando como resultado un enlace adhesivo. Diferentes productos químicos tienen diferentes tipos de mecanismos de enlace para la interacción con las moléculas en el betún.

#### **3.4.2.4 Meteorización**

Ya se han realizado investigaciones para relacionar la intemperie con la adsorción de betún y la energía superficial del árido, pero no se han encontrado resultados claros. En general, se piensa que algunos áridos tienden a meteorizarse más rápidamente que otros y la intemperización tiene un efecto negativo en la adherencia entre el betún y la superficie del árido.

#### **3.4.2.5 Textura de Superficie**

Al principio, una textura de superficie lisa puede ser más fácil de recubrir con una película de aglomerante adecuada, pero la unión mecánica es menor en comparación con una textura de superficie más áspera. Una superficie más áspera tiene un área de superficie más grande por unidad de masa (área de superficie específica) que resulta en una unión adhesiva más fuerte. Sin embargo, cuando el árido es demasiado áspero, es posible que no toda la superficie del árido esté cubierta. (Ver figura 3-11)

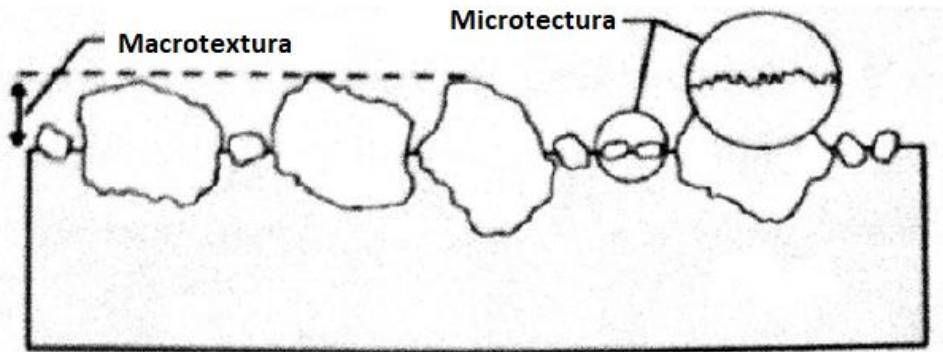


Figura 3-13. Esquema de textura de superficie de un pavimento de asfalto

### 3.4.2.6 Tamaño

Las partículas de áridos para la construcción de carreteras en mezclas asfálticas normalmente son más pequeñas que 22 mm. Por razones de procesabilidad y forma, el tamaño máximo de los áridos es limitado. El tamaño de la piedra triturada se limita a 16 mm para las capas superficiales y a 22 mm para las capas intermedias e inferiores. Las partículas de áridos más finas, el relleno, pueden aproximarse a tamaños más pequeños que 2  $\mu\text{m}$ .

### 3.4.2.7 Forma y Angularidad

Las partículas de áridos más redondos, como la mayoría de las gravas y arenas naturales, se recubren más fácilmente con un aglutinante de betún que los áridos de forma angular. Durante la vida útil, la angularidad puede ofrecer buenos puntos de anclaje para el aglutinante de betún para mejorar la adherencia. Sin embargo, se sabe que un aumento de la angularidad también aumenta la probabilidad de perforar la película de betún. De este modo, el agua puede penetrar más fácilmente en la capa de unión adhesiva y, posiblemente, provocar el desprendimiento. (Ver figura 3.11)

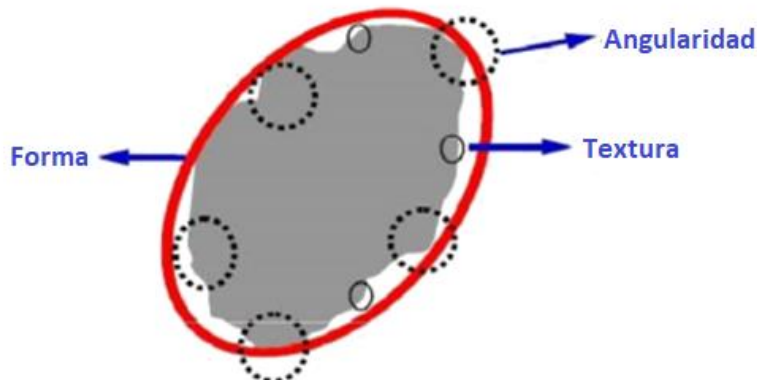


Figura 3-14. Componentes básicos de los áridos: forma, textura y angularidad

### 3.4.2.8 Porosidad y Distribución del Tamaño de Poro

La distribución del tamaño de los poros, en la cual muchos poros están ubicados en la superficie del árido, da

como resultado una textura de la superficie más áspera. Una alta porosidad en la superficie también afecta la absorción del aglutinante de betún. Una desventaja es que la cantidad de betún absorbido en los poros del árido no está disponible para el recubrimiento adecuado del exterior del árido. Esta cantidad podría compensarse con una cantidad adicional de betún durante la fabricación de la mezcla.

#### **3.4.2.9 Impurezas en la Superficie del Árido**

Las impurezas de la superficie incluyen arcilla, polvo (por ejemplo, de trituración de áridos), carbón, esquisto, mica libre, sales y vegetación. Estas impurezas pueden inhibir la unión directa entre el aglomerante de áridos y el betún. De esta manera, no se garantiza una unión adhesiva adecuada.

### **3.4.3 Propiedades de la Mezcla que Afectan Directamente a la Adhesión**

La adhesividad entre el árido y el betún de una mezcla bituminosa puede ser influenciada por una serie de factores muy importantes como son la calidad de los materiales que la componen; siendo así de vital importancia la correcta elección y dosificación de estos en el proceso de creación de la mezcla.

Muchos de los deterioros que surgen en las carreteras están causados por una mala elección, dosificación y puesta en obra de los materiales que componen la mezcla. Dos aspectos muy importantes que influyen en el comportamiento mecánico y la durabilidad de dicha mezcla son la calidad del árido empleado y la adherencia entre las diferentes capas que compone la carretera. Así pues, se puede decir que una buena adherencia entre capas, logra que el conjunto de materiales que componen la mezcla se comportan como un bloque homogéneo; lo que permite aumentar la durabilidad del producto final.

Otro factor a tener en cuenta debe ser el diseño de la propia mezcla bituminosa, ya que sus características varían según el contenido de betún aportado, el porcentaje de huecos o la densidad de la mezcla.

El filler también tiene un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas bituminosas debido a su elevada superficie específica y al aumento de la cohesión y adherencia que aporta al resto de áridos y ligantes, cuyo papel es el de rellenar los huecos que se generan entre los áridos con granulometrías diferentes, impermeabilizar y densificar el esqueleto de dicha mezcla. Este material (filler) puede proceder de la trituración de los propios áridos que integran la mezcla o pueden ser aportados tras procesos industriales.

En resumen, se puede decir que en un sistema multicapa, como es una carretera, se pueden dar movimientos entre ellas, generándose así fisuras de diferentes grados de importancia. Una buena adherencia entre estas capas garantiza el buen comportamiento de un paquete estructural, haciendo que este trabaje solidariamente. La mala adhesión entre capas se traduce a una mala distribución de las tensiones generadas por el tránsito, en el espesor del pavimento (Ricci, 2011).

Cuando dos capas trabajan monolíticamente, siendo su interfase ligada rígidamente por el efecto de la adherencia, una única línea neutra pasa a gobernar el comportamiento mecánico del pavimento (Dr. Hector Luis Delbono, 2016). El que esta línea neutra baje, irá en función tanto de las propiedades elásticas de las capas como de su espesor, dándose aquí una gran importancia al espesor del betún que compone la mezcla.

#### **3.4.3.1 Alto Contenido en Huecos y Permeabilidad**

Se puede decir que el contenido de huecos de aire y la permeabilidad de una mezcla bituminosa va en función del contenido de ligante (betún) que está presente, la proporción de áridos empleada y el grado de compactación.

Una capa de firme con altos contenidos de huecos de aire permite la circulación del agua a través de ellos. Diversos estudios han demostrado que si el contenido de huecos de aire en un firme es menor al 4-5%, hace que estos no estén interconectados, por tanto, son impermeables al agua.

En febrero del año 1980, se empezaron a emplear en España las mezclas bituminosas porosas para capas de rodadura en carreteras, cuya utilización tuvo mucho éxito ya que suponía una mejora en cuanto a la seguridad y comodidad de conducción del usuario.



El objetivo que se perseguía al emplear estas mezclas fue el de usarlas en carreteras que se encontraran en climas lluviosos para aumentar la seguridad y comodidad de la circulación de los vehículos mojados, ya que la presencia de agua en el pavimento y neumáticos del vehículo, dificultaba el contacto con la superficie del firme, dando lugar al deslizamiento del mismo.

Así pues, gracias a la alta porosidad o huecos de dichas mezclas, se absorbía rápidamente el agua caída en el firme, dejándolo seco para mejorar la adherencia neumático-pavimento.

Además de mejorar la adhesividad neumático-pavimento, también se aumenta la macrotextura de este. Las capas de rodadura fabricadas con mezclas bituminosas con un alto contenido en huecos presentan una superficie lisa, llena de oquedades, proporcionando así una alta macrorrugosidad. Esto hace que mejore el rozamiento neumático-pavimento en presencia de agua a altas velocidades, disminuyendo a su vez el ruido producido por este rozamiento, ya que las ondas sonoras se expanden por los huecos presentes en la mezcla. (Viswanathan, 2005)

Otra ventaja que genera es la eliminación de la reflexión de la luz en el pavimento, ya que la luz no puede llegar a reflejarse porque los rayos de esta se pierden por los poros; disminuyendo así accidentes causados por una mala visibilidad.

### 3.4.3.2 Espesor de la Cobertura del Betún sobre el Árido

Los áridos son el mayor componente que está presente en una mezcla bituminosa, alrededor del 94% de su peso, y estos proporcionan la superficie sobre la que el betún se adhiere. Por ello, las características físicas del árido como son la angularidad, porosidad, forma o textura, juegan un papel fundamental en la cobertura árido-betún. Si el árido es angular y tiene una textura áspera, la adhesión con el ligante es mayor; mientras que, si el árido tiene una textura lisa y redondeada, esta adhesión irá en menor proporción. 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.

Por otra parte, la porosidad y capacidad de absorción del árido permite que el betún penetre en mayor o menor medida, mejorando la unión betún-árido. Si el árido presenta una alta porosidad, el ligante proporcionará una mayor cobertura adhesiva ya que penetrará más profundamente en sus poros. No obstante, se debe tener mucho cuidado con el material elegido para la mezcla, ya que, si el árido es muy poroso, el agua que drena en estos huecos puede ser muy difícil de eliminar mediante el proceso de secado, siendo perjudicial la presencia de agua a la hora de prestar cobertura con el betún (Abo-Qudais et al., 2007).

Cuando el árido es de grandes dimensiones se generará una mejor unión con el betún, ya que este ofrece mayor superficie para su adhesión.

Si los áridos están húmedos o cubiertos de filler (polvo mineral), hace que se rompa el vínculo árido-betún, ya que el polvo aumenta la viscosidad del betún y el agua tiende a eliminar dicha viscosidad.

Como se puede ver, 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 betún (Curtis et al., 1993). Los sitios activos del árido contienen cargas que atraen y orientan a los compuestos polares del betún. 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).

### 3.4.4 Influencias Externas

Como hemos comentado en apartados anteriores, las características y propiedades de una mezcla bituminosa, están sometidas a factores externos a ellas, a los cuales deben adaptarse para prolongar su vida útil y su óptimo comportamiento en carretera. Los factores externos pueden influenciar tanto al comportamiento del conductor como al del propio vehículo, pudiéndose generar accidentes de tráfico por fallos estructurales o por fallos de cálculo en cuanto a la dosificación de su composición.

El proyecto de un firme debe perseguir una optimización resistente y funcional de la estructura, con un coste global mínimo que incluya los costes de construcción, conservación y rehabilitación en un periodo comprendido

entre los 30 y 50 años, denominado periodo de proyecto (Luis Bañón Blázquez, tomo 2).

Los factores externos más importantes que deterioran la mezcla bituminosa y por tanto las carreteras son: La temperatura (clima de la zona), el tráfico al que estará sometida, la calidad de la ejecución en obra y la presencia de agua.

#### 3.4.4.1 Temperatura

Si nos referimos al comportamiento vehículo/conductor, el clima puede variar completamente el comportamiento de estos. La nieve, lluvia o niebla modifican las condiciones de adherencia del neumático y disminuyen el campo de visibilidad de la carretera, haciéndole al conductor adaptarse a las condiciones del medio y aumentar la distancia de separación con el vehículo que le precede.

Este factor suele tenerse en cuenta a la hora de fabricar la mezcla bituminosa, sobre todo en la elección de los materiales, haciendo mayor hincapié en la dureza de los betunes de penetración, y en determinados aspectos constructivos tales como el dimensionamiento del sistema de drenaje.

Se debe considerar tanto la temperatura externa diaria a la que va a estar sometida dicha mezcla como a la temperatura estacional, los fenómenos meteorológicos de precipitación y la posible presencia de heladas en el pavimento.

Por otro lado, si un firme está sometido a constantes variaciones de temperatura, la mezcla bituminosa que envuelve al mismo se dilata y contrae repetidamente, generándose así grietas transversales (Muenche, Mahoney y Pierce, 2003).

Las características reológicas de los firmes cambian con la temperatura; de esta forma, se puede distinguir dos comportamientos básicos que experimentan las mezclas bituminosas: las que presentan un flujo importante y una deformación excesiva son susceptibles de producir roderas, mientras que las que tienen un comportamiento más rígido son más propensas a la fatiga y al agrietamiento térmico (Ramos, 2015).

#### 3.4.4.2 Tráfico

El tráfico al que va a ser sometida la carretera, también es un factor externo muy importante a tener en cuenta a la hora de fabricar la mezcla bituminosa, ya que la repetición de cargas y la acumulación de los efectos que estas producen en el firme es la causa del proceso de fatiga de dicho firme, cuyo parámetro es decisivo para calcular la vida útil de la carretera.

Además, se tendrá que hacer más hincapié en tramos especiales como curvas, zonas de frenado o zonas de adelantamientos o aceleración, ya que aquí es donde existirán las presiones máximas de contacto neumático/firme.

La capa de rodadura es la capa del firme que soporta de manera directa los esfuerzos constantes y variables que genera el tráfico, por tanto, debe absorber gran parte de los esfuerzos verticales y horizontales que supone. También debe garantizar las condiciones de adherencia, haciendo que su dimensionamiento y elección de la mezcla sean de vital importancia. La deformación más común que puede generarse en esta capa es las deformaciones plásticas o roderas.

Las roderas corresponden a una deformación transversal por hundimiento a lo largo de las rodadas, acompañado en general de cordones laterales por fluencia del material del pavimento. Son deterioros que se producen por acumulación de deformaciones plásticas debidas a la aplicación repetida de cargas de tráfico, especialmente en condiciones de altas temperaturas o bajas velocidades de aplicación de las cargas (Miro, Jiménez, & Olivier.)

Así pues, para fabricar una mezcla bituminosa óptima para soportar un cierto tráfico, se debe simular previamente los efectos que este va a producir en ella con el tiempo, poniéndolos de manifiesto mediante el ensayo de simulación de la máquina de pista (UNE-EN 12697-22) o el de la máquina giratoria (UNE-EN 12697-31).

### 3.4.4.3 Calidad de la Ejecución en la Obra

Para conseguir una exitosa puesta en obra de una mezcla bituminosa, se debe tener en cuenta varios puntos a controlar durante la ejecución:

1. **Superficie existente:** La superficie donde se va a extender la mezcla bituminosa debe estar completamente limpia, exenta de filler o polvo mineral; por tanto, previamente a su extendido se debe realizar un barrido enérgico, incluso aplicar un riego controlado de imprimación si la capa no ha sido tratada con anterioridad.
2. **Aplicación del betún:** El riego se realizará mediante una regadora con barra distribuidora (ver figura 1) o manualmente por medio de una lanza, en el caso de que sea una superficie pequeña o superficies con recodos. Para asegurarse de una correcta extensión del ligante, es conveniente calentarlo previamente para que su extensión sea continua, homogénea y uniforme.

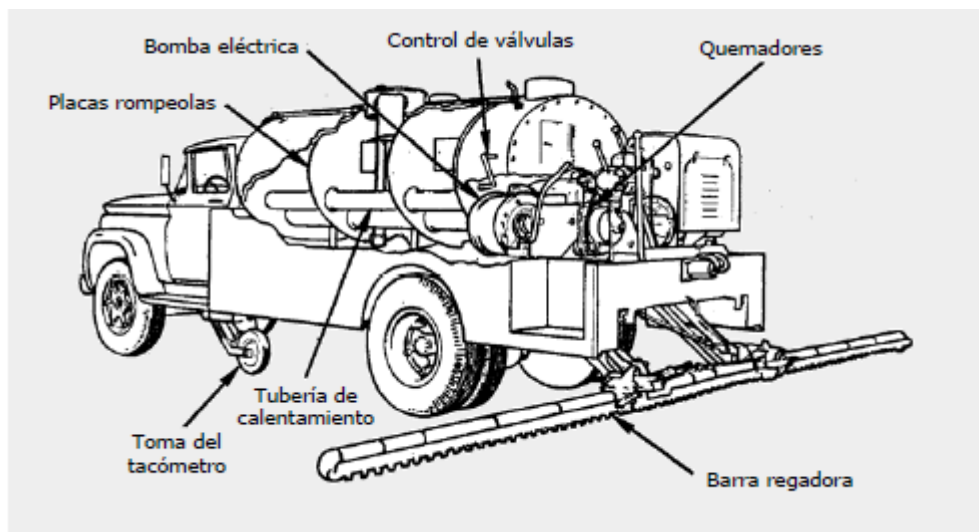


Figura 3-15. Cisterna regadora empleada para la aplicación del betún (Blázquez, 2000)

3. **Extensión del árido:** Su puesta en obra será inmediatamente después a la anterior, para evitar que el betún se enfríe y no pueda adherirse bien a la superficie granular. Ni que decir tiene que este material deberá haber sido tamizado y dosificado previamente, asegurándose en todo momento su uniformidad.
4. **Compactación:** Este proceso debe realizarse con maquinaria de neumáticos lisos de alta presión, ya que estos no son tan pesados como los rodillos metálicos de llanta lisa que pueden incrustar el árido en exceso en el betún o deteriorar su granulometría, modificando así sus propiedades o características. Este proceso también debe realizarse de manera inmediata tras el extendido del árido sobre el betún.
5. **Apertura del tráfico:** La apertura del tramo de carretera tratado debe hacerse en un plazo razonable, dejando que el ligante adquiriera cierta viscosidad que permita su correcta adhesión al árido. Si fuese un tramo muy demandado, se podría permitir la circulación de vehículos a velocidades muy bajas ( $V < 30$  Km/h) durante las primeras horas, aunque no es muy recomendable.

Otro aspecto que debemos mencionar es que antes de realizar la puesta en obra de la mezcla bituminosa, se debe prever el clima que hará en el tiempo de ejecución, ya que los áridos deben ponerse en obra preferiblemente en tiempo cálido, seco y sin la existencia de fuertes vientos, para asegurar las propiedades y características deseadas. De la misma forma, la ejecución del betún debe estar sometida a las óptimas condiciones climatológicas mencionadas.

### 3.4.4.4 Presencia de Agua

La presencia de agua tanto en el proceso de fabricación o elaboración de los diferentes componentes de una

mezcla bituminosa debe estar muy controlada, siendo su valor óptimo casi nulo. Si hablamos de los áridos que componen la mezcla, estos deben encontrarse completamente secos, sometidos previamente a un proceso íntegro de secado y haciendo mucho hincapié en sus poros u orificios que puedan presentar, ya que aquí es donde puede retenerse la humedad generada por el agua. El agua hace que el enlace árido-betún pueda romperse, ya que esta afecta principalmente a la viscosidad del betún, generando así pérdida de su capacidad de adhesión.

Por otro lado, se puede afirmar que el betún en presencia de agua, modifica su consistencia y aumenta su rigidez, el cual hace que se causen contracciones del betún sin cambio de volumen, causando así la separación de sus moléculas y generando la rotura de su superficie uniforme. El endurecimiento o rigidez que experimenta va a influir en el enlace árido-betún, debido a los cambios en la composición química que se produce durante el envejecimiento (Curtis et al., 1993).

### 3.5 Acción del Agua sobre Hormigones Bituminosos

Como hemos mencionado anteriormente, el exceso de agua en una mezcla bituminosa puede generar daños importantes, generando así modificaciones en las propiedades o características de los elementos que componen la mezcla y por consiguiente, generando acciones imprevistas en la fabricación de la misma, alejándose de las condiciones óptimas que se quieren plasmar en una carretera.

Principalmente, el agua afecta a la propiedad de adhesión y cohesión entre las partículas del betún o ligante con los áridos, rompiendo su estado viscoso y, por tanto, generando fracturas en su superficie homogénea y uniforme.

#### 3.5.1 Descripción

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).

El daño principal que la presencia de agua produce en una mezcla bituminosa es el de la pérdida de cohesión en ella y/o una pérdida de adhesión entre ligante-árido. Este proceso es conocido como “stripping” o pérdida de recubrimiento.

#### 3.5.2 Medios de Conducción del Agua

Los daños generados por la presencia de agua son producidos por la filtración de ella por el interior de la estructura del material, produciéndose así una pérdida de capacidad portante del material y generando diversos deterioros del mismo.

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).

Son tres medios por los que se transporta el agua por el interior de las mezclas bituminosas, que dependen de las condiciones medioambientales y de la presencia de huecos en la mezcla:

- Infiltración del agua en estado líquido desde la superficie del pavimento hacia el interior de la mezcla a través de los huecos interconectados. Aquí juegan un papel muy importante los huecos de aire, el tamaño y la granulometría de los áridos empleados en la fabricación de la mezcla, así como el espesor de la capa de ligante y el proceso de compactación llevado a cabo.
- Ascenso por capilaridad del agua líquida proveniente de la superficie inmediatamente inferior a la mezcla. El ascenso capilar se puede definir como el aumento de un líquido por encima del nivel freático, debido a una fuerza ascendente total producida por la atracción de las moléculas del líquido a una superficie sólida. Por tanto, el ascenso por capilaridad irá en función de la

geometría de los capilares, de la tensión superficial del agua, de la densidad del agua y del ángulo de contacto entre el líquido y sólido.

- Difusión del agua líquida y/o vapor de agua a través de los componentes que forman la mezcla. Esto va a depender de los factores humedad relativa, coeficiente de difusión y del potencial de retención del agua. La humedad relativa del aire dependerá de las condiciones medioambientales a la que esté sometida; mientras que el coeficiente de difusión y la capacidad de retención de agua irán en función de las propiedades químicas y termodinámicas de los componentes de la mezcla. (Airey, G.D., Choi, Y.K., 2002)

### 3.5.3 Mecanismos de Fallos Originados por el Agua

El daño producido por el agua en las mezclas bituminosas en caliente puede ser causado por pérdida de adhesión entre ligante-árido (stripping) o por pérdida de cohesión en la mezcla. Por ello, Podemos diferenciar entre fallo adhesivo y fallo cohesivo.

El fallo adhesivo se produce entre el enlace ligante-árido. Cuando el agua penetra en la interfase entre el árido y el ligante, se reduce el contacto entre sus moléculas, perdiendo así adherencia entre ellos (Viswanathan, 2005).

El fallo cohesivo tiene lugar en el interior del ligante, reduciendo la fuerza de cohesión del aglutinante del mismo, rompiéndose los enlaces entre las moléculas del ligante y dando lugar a su dispersión o pérdida de concentración, causando así una gran pérdida de rigidez de la mezcla. También se puede dar el caso de una ruptura de los enlace árido-árido por la presencia de agua, relacionado directamente con la solubilidad del árido.

Estos fallos están íntimamente relacionados entre ellos, por ello, existen discrepancias entre investigadores de la importancia de estos fallos. Unos afirman que los daños ocasionados por la humedad se deben en mayor medida por un fallo adhesivo, mientras que otros indican que la probabilidad de que se produzcan por un fallo cohesivo es mayor.

Por todo esto, a pesar de que 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 posteriori (Sunghwan et al., 2005).

Los mecanismos que se generan tras los daños ocasionados por la presencia de agua son: el desprendimiento, desplazamiento, emulsificación espontánea, presión en los poros, lavado hidráulico y el pH del agua; los cuales, a su vez, pueden actuar de forma conjunta.

- ❖ **Desprendimiento:** Consiste en la separación microscópica de la capa de ligante de la superficie del árido sin llegar a producirse la ruptura de la película de ligante.
- ❖ **Desplazamiento:** Se produce cuando la película de ligante es eliminada por completo de la superficie del árido. Este mecanismo está relacionado con el anterior (desprendimiento), ya que la ruptura de la película de ligante se genera porque el agua se filtra previamente por el interior del ligante a través de una microrrotura de la capa del mismo, llegando a contactar el agua con la superficie del árido, generándose así la ruptura completa de la cobertura ligante-árido. 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, a las cargas producidas por el tráfico o por condiciones ambientales como ciclos de congelación-descongelación (Kiggundu et al., 1988; Little et al., 2003; Viswanathan, 2005).
- ❖ **Emulsificación espontánea:** Se produce cuando se forma una emulsión inversa de gotas de agua en el ligante. Existen dos tipos de emulsiones inversas. La primera es la más común, donde el ligante está disperso en agua. La segunda es una emulsión inversa; es decir, el agua está dispersa en el ligante.

- ❖ **Presión en los poros:** La presencia de poros en las mezclas bituminosas hacen que el agua pueda quedar atrapada en estos huecos y tras un aumento de temperatura y las diversas cargas producidas por el tráfico hacen que el agua se evapore y busque salida, generando importantes presiones internas que pueden dar lugar a la ruptura de la película del ligante.
- ❖ **Lavado hidráulico:** Cuando se produce el contacto entre neumático-pavimento 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 el tráfico es la más alta. Este proceso constante de compresión-tensión hace que se desgaste la película de ligante.
- ❖ **pH del agua de contacto:** El pH del agua puede afectar a la adherencia entre árido y 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).

### 3.5.4 Manifestaciones de los Daños Originados por el Agua en el Firme

La presencia de agua en mezclas bituminosas hace que se manifiesten en el firme deterioros tanto en sus materiales que componen esta capa, como en el diseño y características y/o propiedades de la misma.

Puede generarse una reducción de la resistencia de la mezcla bituminosa empleada, que puede dar pie a la formación de grietas o roderas en la capa del firme, afectado así a su diseño original y facilitando tanto el deterioro del conjunto de capas de la carretera como aumentando el riesgo de accidente en la circulación de vehículos.

Este agrietamiento se produce por una pérdida parcial o completa de la adhesión entre el árido y el ligante/betún, siendo a su vez causada por varios factores como un inadecuado proceso de secado del árido, un mal drenaje de la mezcla o una mala compactación de la misma. Esta propiedad se ve agravada por la presencia de los ciclos de tráfico y del proceso de congelación-descongelación que experimenta el firme en las diferentes estaciones del año.

Otro deterioro que se puede generar por la presencia de agua en el firme es el llamado “Raveling”. Consiste en el desprendimiento progresivo de los áridos de la superficie de la mezcla, agravado por los neumáticos de los vehículos sobre la mezcla bituminosa (Huérfano, Mayo, 2012).

### 3.5.5 Factores que Contribuyen en los Daños Originados por el Agua

Los impactos económicos que generan los daños producidos por la presencia de agua en una mezcla bituminosa son muy significativos, ya que obligan a llevar a cabo excesivos mantenimientos de la carretera y procedimientos de rehabilitación muy costosos.

La sensibilidad de las mezclas bituminosas al agua depende de varios factores como las propiedades de los materiales que la componen, los parámetros de diseño de la mezcla, el nivel de tráfico al que van a estar sometidas o a los factores ambientales a los que están expuestas.

Estos factores se dividen a su vez en factores internos y factores externos.

#### 3.5.5.1 Factores Internos

Los factores internos son aquellos factores que están directamente relacionados con las propiedades de los materiales que forman la mezcla, es decir, los áridos y el ligante.

**Áridos:** Es el material más presente en una mezcla bituminosa, alrededor del 94% de su peso total y es el que facilita la superficie sobre la que el ligante se adhiere. Como anteriormente hemos mencionado, los áridos se clasifican según sus características como la composición, superficie química, morfología, distribución del

tamaño de los poros, etc. Por esto, resulta de vital importancia evaluar minuciosamente los daños producidos por el agua en función del árido empleado. En la mayoría de los casos, el desprendimiento o stripping, tiene lugar en la porción del árido grueso de la mezcla bituminosa, aunque hay otros casos en los que el árido fino es muy sensible al agua, y el desprendimiento se produce en esta parte de la mezcla (Sengoz, 2007).

Por otro lado, las características físicas de los áridos como angularidad, porosidad, forma y textura, también juegan un papel fundamental. Se puede afirmar que mientras más angular y áspero sea el árido, mayor superficie de adhesión estará dispuesta para el ligante; sin embargo, esta angularidad puede generar una cierta dificultad en el recubrimiento uniforme del ligante, quedando los bordes del árido a la intemperie y generando perforaciones en la película del ligante, dando lugar a una mayor sensibilidad de la mezcla a la presencia de agua.

La presencia de una alta porosidad en los áridos hace que la capacidad de penetración del ligante sea mayor, profundizando este en el interior de los poros y mejorando así el enlace árido-ligante; sin embargo, el proceso de secado se dificulta, ya que el agua queda estancada en el interior de los poros; lo cual es perjudicial para la mezcla.

La presencia de polvo o filler en un árido, resulta perjudicial para el vínculo árido-ligante, ya que este polvo aumenta la viscosidad del ligante y en contacto con el agua se rompe dicho vínculo.

La composición mineralógica del árido en términos de su naturaleza hidrófila e hidrófoba y su afinidad con el ligante, también son importantes. 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 principal es el carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ), son más resistentes a los daños por agua. Los áridos calizos, después de la molienda, exponen los iones calcio con características electropositivas, estos iones compiten en la unión con el agua y el ligante. Debido a su carácter básico forman enlaces más fuertes con los ácidos del ligante, creando sales hidrófobas. Mezclas bituminosas con áridos con altos contenidos en sílice, como el granito o como el basalto, son más susceptibles al agua, debido a que los enlaces que forman con el ligante son más débiles (Bagampadde, 2005; Gorkem, 2009).

**Ligante:** El betún es una mezcla de compuestos orgánicos, mayormente hidrocarburos no polares, con distintas estructuras y peso molecular. Podemos mencionar hidrocarburos con diferentes heteroátomos como el nitrógeno, oxígeno y azufre; así como metales tales como hierro, vanadio y níquel.

Los heteroátomos forman compuestos 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 (Bagampadde, 2004; Arambula, 2007).

A su vez, el betún también contiene una cierta cantidad, aunque en menor medida, de compuestos orgánicos polares, los cuales incluyen ácidos y bases, como los ácidos carboxílicos y anhíbridos.

El ligante en presencia de agua, aumenta su rigidez, modificando su consistencia y causando contracciones del ligante sin cambio de volumen. Esto genera agrietamientos en la mezcla y, por tanto, en el firme de la carretera.

Para disminuir la susceptibilidad al agua de las mezclas bituminosas se han modificado los betunes con polímeros como elastómeros y plastómeros.

Otro factor del betún que se debe tener en cuenta para disminuir la susceptibilidad de la mezcla a la presencia de agua es el espesor de la película. Diversos estudios empíricos han demostrado que el espesor óptimo del ligante debe estar comprendido entre 9,5 y 10,5 mm, ya que conforme más delgada sea la película, más probabilidad de fracaso adhesivo existirá.

Como conclusión, se puede decir que el grado en el que afecta el betún va a depender de los áridos que se utilicen en la mezcla bituminosa, por lo tanto, el betún es menos dominante, en este sentido, que los áridos (Sengoz, 2007).

### 3.5.5.2 Factores Externos

Los factores externos más significativos que influyen en el daño producido por la presencia de agua son la fabricación y producción de la mezcla bituminosa, el nivel de tráfico y las condiciones medioambientales.

**Fabricación y producción de la mezcla bituminosa:** Hay que prestar mucha atención al estado de los principales componentes de una mezcla bituminosa.

Por una parte, el árido que se emplea en una mezcla, suele estar acopiado y si hay exceso de polvo en ellos, se dificultaría la unión ligante-árido; por tanto, los áridos deben mantenerse limpios y tratados cada cierto tiempo para evitar este problema de adherencia.

También se debe tener presente las condiciones climatológicas a las que los acopios de áridos están sometidos, ya que, si llueve, el árido puede absorber el agua a través de sus poros, dificultando su proceso de secado y afectando así directamente a la adherencia árido-betún.

Por otro lado, debemos dosificar con exactitud el contenido de ligante en una mezcla, para que no se produzca escurrimientos por una escasez de viscosidad.

Las mezclas bituminosas fabricadas en plantas, deben ser trasladadas rápidamente a la zona donde se van a emplear, para evitar un excesivo enfriamiento de esta, dificultando así la adherencia con el árido o capa.

Otro factor fundamental a la hora de la producción de una mezcla es su proceso de compactado, el cual tiene como objetivo lograr una óptima densidad durante el extendido de dicha mezcla. Una compactación insuficiente será más susceptible al agua, ya que la presencia de huecos o poros en una mezcla hace que el agua pueda filtrarse y circular por ellos, adentrándose en su interior y afectando tanto a la mezcla como a las capas inmediatamente inferiores.

La maquinaria empleada para esta compactación tiene que ser la idónea, ya que si está es demasiado pesada o presenta un mal estado, puede fracturar al árido y, por tanto, deteriorar la unión con el betún, dejando este expuesto a la intemperie.

**Nivel de tráfico:** Tanto el tipo como el volumen de tráfico son variables fundamentales. Cuando el firme se encuentra en un estado saturado, el agua presente en los huecos de la mezcla produce presiones o fuerzas interiores, que, junto con el paso de vehículos, generan estados de tensión-deformación que pueden acelerar la aparición de daños producidos por el agua (Shah, 2003; Sengiz, 2007).

**Condiciones ambientales:** Los cambios de temperatura, los ciclos de congelación-descongelación, ciclos de lluvia y sequía, así como el pH del agua pueden provocar daños en la mezcla.

Respecto a la temperatura, podemos decir que, si esta es demasiado baja, no se aconseja la ejecución de un firme, ya que resultaría muy dificultoso lograr la densidad deseada.

Los ciclos de congelación-descongelación hacen que el agua que se encuentra en los huecos de la mezcla aumente de volumen (congelación), empujando así las paredes internas del árido, y posteriormente disminuya el volumen del agua (descongelación), generando la liberación de fuerzas de empuje y produciendo daños de fracturación interna.

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.

### 3.5.6 Procedimientos para Apaliar la Sensibilidad al Agua

Como se puede observar tras lo descrito, el agua puede generar importantes daños en el firme de una carretera, aumentando la frecuencia de mantenimientos que deben realizarse para su adecuada conservación y, por tanto, generando un gasto adicional a la carretera. Hoy en día, existen diversidad de aditivos que se utilizan para



mejorar la adhesión entre árido y ligante, dificultando así el agrietamiento o rotura de la mezcla bituminosa y contradiciendo el efecto dañino que puede generar el agua.

También, existen una gran cantidad de tratamientos a llevar a cabo directamente en el ligante para reducir la sensibilidad de este al agua, aumentando su resistencia a la presencia de ella. En estos tratamientos se utilizan productos químicos denominados líquidos anti-stripping, los cuales, la mayoría de ellos, 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). Estos productos suelen ser catiónicos, lo cual hace que se promueva la adhesión entre la superficie de los áridos ácidos y el betún. No obstante, cabe mencionar que estos productos no cambian las propiedades reológicas del ligante (Kanitpong, 2008).

Es fundamental que estos productos químicos sean estables a las altas temperaturas y al almacenamiento, ya que durante largos periodos de tiempo y sometidos a condiciones caloríficas, la eficacia de estos aditivos puede reducirse debido a las reacciones que se pueden originar.

En Moghadas introdujeron en las mezclas un aditivo denominado “Zycosoil”, el cual eliminaba de forma permanente la superficie del árido sensible al agua. En las mezclas estudiadas, se empleaba como árido la caliza o el granito. El Zycosoil produce una capa hidrófoba en el árido, convirtiendo el silano en siloxano, y como resultado, mejoraba la adherencia y disminuía la sensibilidad al agua. Según el tipo de árido empleado, se aumentaba la resistencia a tracción indirecta en un 3% en las mezclas que contenían caliza y en un 14% en las que contenían granito.

En Aksoy, hacían más hincapié en el tratamiento del ligante, utilizando aditivos que introducía directamente en el betún. Realizaron numerosos ensayos sobre el betún y sobre las mezclas bituminosas y comprobaron que disminuía la sensibilidad al agua en las mezclas a las que se le adicionaban los aditivos. Hay estudios que demostraban que algunos polímeros podían actuar como agentes anti-stripping.

En caso Gorkem, utilizaron dos tipos de betunes modificados con polímeros SBS y EAV. Para realizar las mezclas se utilizaron por un lado áridos calizos y por otro una mezcla de áridos tipo basalto y caliza. El resultado fue que el betún modificado con polímeros proporciona una mejor adhesión árido-betún que una mezcla donde se emplee un árido base.

Existen 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 tratamiento que se utiliza para la reducción de la mezcla a la sensibilidad del agua es la adición de cal. Estos aditivos son los que más se utilizan. Puede ser empleada tanto en estado hidratado sobre un árido seco o como sobre un árido húmedo durante el proceso de fabricación de la mezcla. También puede se puede adicionar en la mezcla como lechada de cal, aunque es menos efectiva a la hora de su adherencia, ya que la cal hidratada aumenta la rigidez, resistencia y tenacidad del mástico y mejora la unión interfacial árido-ligante.

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).

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, 2005), aunque el efecto que produce varía con la granulometría de la mezcla bituminosa utilizada (Abo-Qudais, 2007; Khodaii et al., 2012). 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).



## 4 INVESTIGACIONES REALIZADAS

*Investigar es ver lo que todo el mundo ha visto, y pensar lo que nadie más ha pensado.*

*- Albert Szent-Györgyi -*

Este capítulo combina las metodologías localizadas mediante el “estudio del arte” del tema a tratar y los métodos empleados según las normativas seguidas en laboratorio.

### 4.1 Determinación de la Sensibilidad al Agua Mediante Ensayos de Laboratorio

Para determinar la sensibilidad al agua de un firme, se debe simular o reproducir lo máximo posible los efectos que esta produce; por tanto, se debe experimentar en laboratorios tal efecto mediante diferentes ensayos.

Existen diversidad de ensayos que tienen como objeto el estudio cualitativo y cuantitativo de la sensibilidad del agua y los efectos negativos que esta produce en un firme, los cuales a su vez se pueden dividir dos grandes métodos.

Por un lado, tenemos los métodos de ensayo sobre mezclas bituminosas sin compactar el cual, presenta diferentes métodos como el “Boiling water test”, el “Static Immersion test”, la adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos en presencia de agua, la determinación entre la afinidad entre áridos y ligantes y el “Net Adsorption test”.

Por otro lado, podemos diferenciar los métodos de ensayo sobre mezclas bituminosas compactadas, los cuales se dividen en el ensayo de “Modified Lottman Test”, el “Immersion-Compression Test”, el “Tunnicliff and Root test”, el ensayo de inmersión-compresión (España), el de sensibilidad al agua, el “Hamburg Wheel Tracking Device (HWTD)” y el “Environmental conditioning System (ECS)”.

#### 4.1.1 Métodos de Ensayo para Mezclas Bituminosas sin Compactar

Los métodos de ensayo para mezclas bituminosas sin compactar consisten fundamentalmente en la inmersión de la mezcla suelta en agua o una solución química, a diferentes grados de temperatura, durante un periodo de tiempo, para posteriormente realizar una inspección visual sobre el estado de adhesión del betún-árido. Como se puede observar, este método se fundamenta en pruebas cualitativas; por tanto, los resultados son bastante subjetivos y dependen de la experiencia e interpretación de la persona que realiza dicho ensayo.

Como anteriormente hemos mencionado, existen diferentes métodos de ensayo los cuales son:

- ❖ Boiling wáter test

Este ensayo consiste en sumergir en agua hirviendo una muestra de mezcla bituminosa en caliente sin compactar durante 10 minutos, sometida a un agitación constante con una varilla de vidrio. Después de este tiempo, la mezcla se saca del recipiente y se observa de manera visual la superficie total del árido que conserva el recubrimiento original después de la ebullición.

Si como resultado obtenemos que el recubrimiento es inferior al 95% del recubrimiento original, se considera que esa mezcla es susceptible al agua.

Este método de ensayo sólo refleja la pérdida de adherencia y no contempla la pérdida de cohesión. Además, este método es compatible solamente con áridos de ciertos tamaños, ya que en un árido fino, resulta muy difícil visualizar el porcentaje de recubrimiento del betún.

#### ❖ Static Immersion test

Este ensayo es similar al anterior. La muestra de mezcla bituminosa se sumerge en agua destilada a una temperatura de 25°C durante un periodo de tiempo entre 16 y 18 horas. La inspección visual del estado del recubrimiento del betún sobre el árido se realiza estando aún la mezcla sumergida en agua. Si el resultado es inferior al 95% se llega a la conclusión que la mezcla es sensible al agua.

#### ❖ Adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos en presencia de agua

Este método es el utilizado en España análogo al Stati Immersion test. La mezcla es sumergida en agua a temperatura ambiente (aproximadamente 25°C) y se deja reposar durante un periodo de tiempo de 16 a 18 horas. Pasado ese tiempo, se visualiza el estado del recubrimiento del betún sobre el árido, usando como parámetro límite el 95%.

#### ❖ Determinación entre la afinidad entre árido y ligante

Este ensayo tiene como objetivo la determinación de la afinidad entre el árido y el betún. Para ello, se emplea el método de la Botella Giratoria, el cual consiste en introducir en una botella una muestra de mezcla bituminosa y agua destilada a temperatura ambiente, y someterla a un movimiento mecánico giratorio constante y uniforme, observando así el comportamiento del betún sobre el árido adherido.

#### ❖ Net Adsorption test.

Fue desarrollado por Curtis et al. en 1993. El objetivo que pretendía con este ensayo era el de seleccionar el adecuado betún y árido para una mezcla bituminosa en caliente, así como determinar la eficacia de los aditivos anti-stripping. El ensayo se basa en medir la relación físico-química 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%.

### 4.1.2 Métodos de Ensayo para Mezclas Bituminosas Compactadas

Existen diversidad de ensayos para mezclas bituminosas compactadas, tanto ensayos fabricando la mezcla en laboratorio como extrayendo in situ una muestra del firme. Todos ellos, se tratan de métodos cuantitativos, sumergiendo en agua a la mezcla en unas condiciones que generen cambios en sus propiedades mecánicas. La relación entre las muestras acondicionadas y no acondicionadas es las que ayudan a estimar la susceptibilidad al agua comparando su valor con un valor umbral estipulado previamente. Según el resultado numérico, se puede afirmar que la mezcla es susceptible al agua si el resultado del ensayo es inferior al valor umbral.

Los ensayos más importantes para mezclas bituminosas compactadas son:

❖ Modified Lottman test.

Este es el ensayo más utilizado en EEUU. Las muestras de la mezcla extraídas del firme pueden ser compactadas tanto con el compactador Marshall, como con un compactador giratorio. El ensayo consiste en fabricar dos grupos de tres probetas cada uno, con un contenido de huecos aire similar.

Un grupo de probetas serán el llamado grupo de control, siendo este el que presente las probetas sin acondicionar, las cuales serán sumergidas en agua a temperatura ambiente (25°C) medidas en una bolsa de plástico.

El otro grupo será el llamado grupo 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%. Una vez alcanzado este grado de saturación, este grupo se someterá a un ciclo de congelación-descongelación metiendo las probetas en bolsas con agua en un congelador a -18°C durante 16 horas como mínimo. Pasado este tiempo, se someten a un baño de agua a temperatura de 60°C durante un día completo (24 horas) y finalmente, 2 horas antes de romper las probetas, se sumergirán en agua a temperatura ambiente (25°C aproximadamente).

El resultado de la relación entre la resistencia a tracción (TSR) de las probetas no acondicionadas y las acondicionadas, nos determinaran el grado de susceptibilidad al agua. El valor umbral que emplean la mayoría de los organismos es de 0.80 (80% de TSR). Si esta relación es inferior al 80% de la resistencia a tracción, se podrá decir que la mezcla es susceptible al agua.

Decir que otros organismos, consideran como aceptable el valor de TSR del 70%.

❖ Tunncliff and Root test.

En este ensayo, se fabrican seis probetas en total con un contenido de huecos entre 6-8%, clasificándolas en dos grupos de tres probetas. El primer grupo es el que representa a las tres probetas que no han sido acondicionadas y el segundo presenta las probetas restantes acondicionadas; es decir, estas probetas se introducen en un sistema de vacío.

Todas las probetas se saturan y después de este proceso, se someten a un baño de agua durante 24 horas a 60°C. Pasado este tiempo, se someten a una temperatura de 25°C y se procede a la rotura de las probetas. El TSR mínimo aceptable será entre el 70-80%.

❖ Ensayo de inmersión-compresión.

En este ensayo español se fabrican un total de 10 probetas, divididas en dos grupos de 5 cada uno (grupo seco y grupo húmedo). Un grupo se mantiene a temperatura ambiente (25°C) antes de la rotura de ellas.

En el otro, se sumergen en un baño de agua a temperatura de 60°C durante 1 día completo ó 4 días completos a 49°C, para posteriormente someterlas a un baño en agua a 25°C durante 4 horas. El resultado que se puede obtener de este ensayo es el llamado índice de resistencia conservada (IRC) mediante la comparación de la resistencia a compresión de probetas de los dos grupos (seco y húmedo).

❖ Sensibilidad al agua

Este ensayo europeo describe tres métodos diferentes; sin embargo, el más utilizado es el método C.

En este método se fabrican 6 probetas cilíndricas que se dividen en dos grupos 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 comprendido entre 68-72 horas. La fuerza de tracción indirecta de cada grupo se determina siguiendo las pautas descritas en la norma EN 12697-23 (AENOR, 2004b) a la temperatura de 15°C.

Se calcula la relación de la resistencia a tracción indirecta (ITSR) del grupo acondicionado en agua, y del grupo seco, expresándose dicho resultado en porcentaje.

❖ Hamburg Wheel Tracking Device (HWTD)

Este ensayo, a diferencia de los descritos anteriormente, tiene en cuenta el efecto del paso de tráfico en los daños producidos por el agua.

Su objetivo es el de predecir la deformación permanente y el daño producido por el agua en mezclas bituminosas en caliente.

Las probetas que se fabrican se sumergen en agua y se someten al paso de una rueda. 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.

❖ Environmental conditioning System (ECS)

Este ensayo fue desarrollado por la Universidad de Oregón a través del programa Strategic Highway Research, SHRP. En este sistema también se tiene en cuenta el efecto del tráfico en los daños producidos por la presencia de agua.

Este sistema se divide a su vez en tres subsistemas: acondicionamiento del fluido, cámara de acondicionamiento ambiental y un sistema de carga. El sistema de acondicionamiento del fluido está conectado con la cámara de acondicionamiento ambiental en la que se aloja un bastidor de carga. Los extremos de la probeta se encuentran sellados mediante una membrana para realizar el vacío.

A la probeta en seco se le determina el módulo resiliente y la permeabilidad. Posteriormente, se pasa el agua a través de la muestra y se aplica vacío. La muestra saturada se somete a tres ciclos térmicos a 60°C y un ciclo de congelación a -18°C durante 6 horas, para posteriormente, acondicionar la probeta a temperatura ambiente (25°C) durante 2 horas y se vuelve a determinar el módulo resiliente y la permeabilidad.

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.

## 4.2 Métodos de Ensayo para Determinar el Efecto del Agua en España: 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-compresión), NLT-162” (CEDEX, 2000b). Sin embargo, 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).

Esta norma europea, describe tres métodos para determinar el efecto de saturación y acondicionamiento acelerado de agua. Dichos métodos pueden usarse para evaluar el efecto de humedad, con o sin activantes de adhesividad, incluyendo líquidos, como aminas, y filleres como la cal hidratada o el cemento.

El método A emplea la resistencia a la tracción indirecta de probetas cilíndricas de mezclas bituminosas.

El método B emplea la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de mezclas bituminosas.

El método C, define el valor de adherencia de mezclas bituminosas tipo SA, una hora después del proceso de mezclado, donde la unión entre betún y árido puede identificarse como el valor de adherencia.

Se puede decir que tanto el método A como el método B dan el mismo resultado, ya que la resistencia a tracción y la resistencia a compresión están íntimamente relacionadas. Sin embargo, si la esbeltez de las probetas es menor de 0,5 (50%), el método B no es conveniente realizarlo.

Añadir que ambos métodos son adecuados para mezclas bituminosas tipo SA con betún de una viscosidad a 60°C mayor de 4000 mm<sup>2</sup>/s.

El método C, es adecuado para mezclas bituminosas tipo SA, con un betún de viscosidad a 60°C de 4000 mm<sup>2</sup>/s o menor, para el que los métodos A y B no son adecuados.

#### **4.2.1 Sensibilidad al Agua. UNE-EN 12697-12, Método C**

Como anteriormente se ha mencionado, el método C de la norma europea UNE-EN 12697-12, define el valor de adherencia de mezclas bituminosas tipo SA, una hora después del proceso de mezclado, donde la unión entre betún y árido puede identificarse como el valor de adherencia, siendo este método de correcta aplicación para mezcla bituminosas tipo SA con betún de una viscosidad a 60°C mayor de 4000 mm<sup>2</sup>/s, ya que, de lo contrario, se debería aplicar los métodos A ó B.

Según la Orden 24/2008 del ministerio de Fomento sobre el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG3-), 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).

Este método consiste en fabricar seis probetas cilíndricas y agruparlas en dos grupos de tres probetas cada uno. Un grupo se mantiene sin acondicionar, es decir, se mantiene seco a temperatura de 25°C (temperatura ambiente), mientras que las probetas del otro grupo se saturan y se sumergen en agua a una temperatura de 40°C durante un periodo de tiempo de entre 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.

### **4.3 Métodos de Ensayo para Determinar el Efecto del Agua en Polonia: PN-84/B-06714/22 y EN 12697-11**

En este apartado vamos a describir dos ensayos reales que hemos realizado para evaluar las propiedades de adhesión de áridos tales como granito, basalto, caliza y escoria de fabricación de acero, utilizando dos métodos. El primer método se trata del ensayo de la "prueba de ebullición" según la norma polaca (PN-84/B-06714/22); mientras que el segundo método se trata del ensayo de la "prueba de botella rodante" según la norma europea (UNE EN 12697-11).

#### **4.3.1 Determinación de la Adhesión del Betún. (Método de Ensayo para Asfalto Caliente). PN-84/B-06714/22**

La prueba de adhesión se realizó mediante el método de ebullición según la norma polaca PN-84 B-06714/22, determinación de la adherencia del betún - Métodos de prueba para mezcla asfáltica en caliente.

##### **■ Áridos:**

Los áridos utilizados para las pruebas se tamizaron para obtener áridos de fracciones 10/12,5 mm con los que se realizaría el estudio. Luego se extrajo una muestra de 300 g.

La muestra total se lavó con agua para limpiar el polvo de las partículas de áridos y luego se secó a una temperatura constante de (110 ± 5) ° C. Después del enfriamiento global, se recogieron dos muestras

de 100 g como se muestra en la tabla 4.1.

■ **Betún:**

Se calentó una muestra de aproximadamente 200 g de betún en una placa de metal o esmalte, pero no pudiéndose superar la temperatura mostrada en la Tabla 4.2. El betún y el árido se separaron en dos muestras paralelas de acuerdo con la Tabla 4.1.

Tipo de betún	Peso de la muestra, dependiendo de la fracción de árido, g.					
	4,0/6,3		6,3/10,0		10,0/12,5	
	Betún	Árido	Betún	Árido	Betún	Árido
betún 50/70	0,8	30	1,8	50	2,7	100

Tabla 4-1. Peso de la muestra ensayada

■ **Mezcla de árido y betún:**

Se prepararon varias muestras de áridos y betún para posteriormente calentarlas en una cámara de secado, donde la temperatura se mantuvo de acuerdo con la Tabla 4.2. El árido se calentó durante 1 hora, mientras que el betún entre 5-10 minutos.

Según la norma polaca PN-EN 12697-35, “*Mezclas bituminosas - Métodos de prueba para mezcla asfáltica en caliente. Parte 35: Mezcla de laboratorio. Asfalto calentado a una temperatura de 150 °C*”, el árido adecuadamente calentado y el asfalto se mezclan de manera muy eficaz; por tanto, esta se sometió a la temperatura de 150°C y se continuó la agitación hasta completar y cubrir uniformemente todo el árido con el betún. La muestra preparada se colocó en un vaso de precipitados y se dejó reposar a temperatura ambiente durante 2 horas.

Tipo de betún	Temperatura, °C.	
	Betún	Árido
Betún 50/ 70	150-170	150-170

Tabla 4-2. Temperatura a la que se somete la mezcla

■ **Procedimiento del ensayo:**

Realizamos la prueba después de enfriar la muestra a temperatura ambiente. Agregamos agua destilada en una cantidad de 130 g en los vasos de precipitación donde los áridos de cada muestra se fraccionaron 10.0 / 12.5 mm





Figura 4-1. Calentamiento de vaso de precipitación con agua destilada y áridos recubiertos de betún

Ni que decir tiene que el vaso de precipitados debe estar en el calentador hasta que el agua alcance su punto de ebullición, que debe ocurrir a  $\pm 1$  minuto.

Una vez iniciada la ebullición, mantuvimos las condiciones de reflujo durante 3 minutos. Durante este proceso, extrajimos el betún que quedaba suelto en la superficie del agua. Una vez finalizado el proceso de cocción, retiramos el exceso de agua de la muestra y vertimos la muestra en un papel de filtro, teniendo cuidado de que la muestra no se deshiciese en granos individuales.

Las valoraciones del estado final de la muestra se realizaron de manera visual una vez la muestra se encontraba seca.

Comentar que la diferencia del resultado entre dos áridos paralelos, no debe exceder el 10%. En el caso que lo haga, debemos repetir la prueba.

En nuestro caso, esta fue satisfactoria, pues la diferencia que había entre el estado de áridos era en torno al 5%, donde el 100% representa la cobertura completa de los granos.

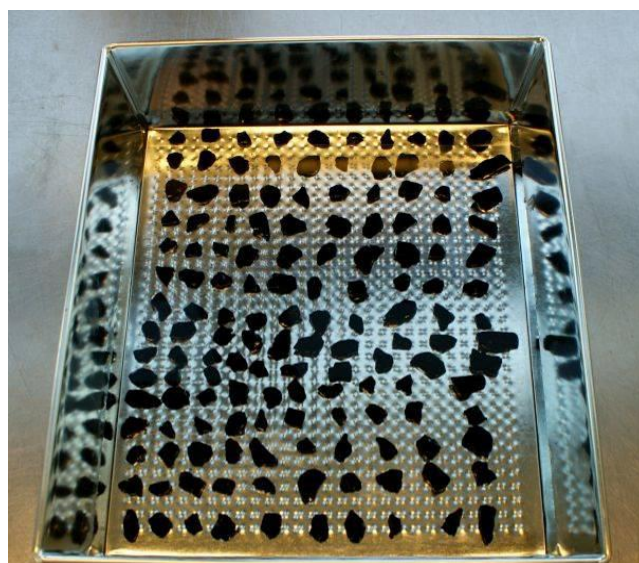


Figura 4-2. Árido cubierto de betún

La norma nos recomienda hacer la evaluación visual entre dos operadores por separado. Así pues, podrán realizar una comparativa de los resultados obtenidos. El resultado del cálculo final será el promedio de las dos determinaciones.

### 4.3.2 Determinación de la Afinidad entre Árido y Betún. UNE-EN 12697-11

La prueba de adhesión se realizó mediante el método de la botella según EN 12697-11 Mezclas bituminosas - Métodos de prueba para mezcla asfáltica en caliente. Parte 11: Determinación de la afinidad entre el árido y el betún.

#### ■ Árido:

La prueba se realizó con el árido que pasó por el tamiz de 11,2 mm y se retuvo en el tamiz de 8 mm, tal y como indica la norma EN 12697-2. Las fracciones menores de 5/8 mm no son aceptables para el método de botella rodante porque forman grupos durante el proceso de laminación.

Separamos al menos 600 g de árido con un balance (porque es el material necesario para 3 botellas). A continuación, se lavaron los áridos seleccionados, hasta quedar completamente limpios.

Colocamos los áridos en el horno ventilado ajustado a  $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$  y posteriormente, los secamos en otro horno a una temperatura constante de  $180^\circ\text{C}$ .

#### ■ Betún:

La muestra debe incluir cualquier modificador y/o agente de adhesión en la misma proporción en la que se utilizarán en la mezcla de plantas. Se utilizó asfalto 50/70 (un tipo de ligante). Vertimos el betún muestreado en recipientes de metal que estaban cubiertos.

#### ■ Mezcla de áridos y betún:

La temperatura de mezclado debe ser la temperatura de referencia para las mezclas como se define en EN 12697-35. Los áridos se vertieron en un recipiente junto con el betún, y se introdujo el recipiente en el horno de ventilación ajustado a la temperatura correspondiente de mezcla  $\pm 5 ^\circ\text{C}$  (no menos de 3 h).

Se repitió el mismo proceso, pero esta vez con el ligante en un contenedor. Se debe colocar el recipiente en el horno de ventilación ajustado a una temperatura correspondiente a la temperatura de mezcla  $\pm 5 ^\circ\text{C}$  (para una duración de  $3 \pm 1$  h). Antes de mezclar, compruebe la temperatura del aglutinante y agítelo.

La cantidad de betún que se añadió corregirá a la densidad del árido real multiplicando por el factor  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{2,65 \left(\frac{\text{tn}}{\text{m}^3}\right)}{\text{aggregate density} \left(\frac{\text{tn}}{\text{m}^3}\right)}$$

Densidad de los áridos:

- Granito:  $2,7 \text{tn} / \text{m}^3 \rightarrow \alpha = 2,65 / 2,7 = 0,98$
- Basalto:  $3,09 \text{tn} / \text{m}^3 \rightarrow \alpha = 2,65 / 3,09 = 0,86$
- Piedra caliza  $2,2 \text{tn} / \text{m}^3 \rightarrow \alpha = 2,65 / 2,2 = 1,20$
- Escoria de acero:  $3,3 \text{Mg} / \text{m}^3 \rightarrow \alpha = 2,65 / 3,3 = 0,80$

La prueba se realizó con la fracción de árido 8/11 mm y se agregó una porción de  $16 \text{g} \pm 0,2 \text{g}$  de betún en un recipiente. Mezclamos cuidadosamente con una espátula y procedimos inmediatamente con el proceso de mezclado entre el árido y el betún.

Es muy importante que toda la superficie del árido se cubra con betún. Deseche el material mezclado si no se obtiene una cobertura total de betún (100%).

Dividimos rápidamente el material sobre la tapa metálica plana o el papel recubierto de silicona.

Se debe evitar los grumos en el betún que recubre el árido. Asegúrese de que el material se propague

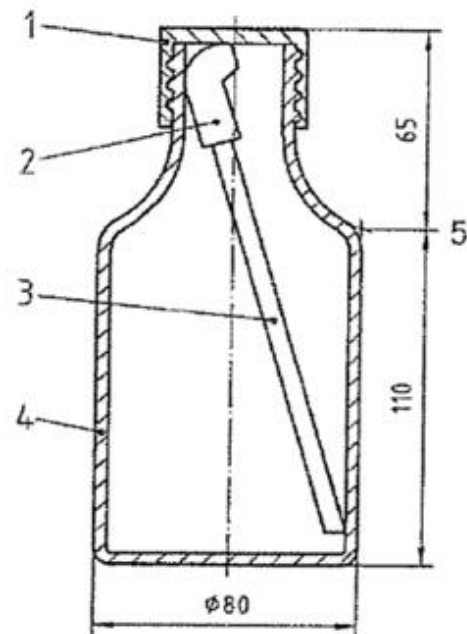
libremente como partículas individuales.

Por último, almacenamos el material mezclado en papel de silicona entre 12 y 64 horas a una temperatura ambiente de  $(20 \pm 5) \text{ C}$  y evitamos la exposición directa a la luz solar y la contaminación con polvo.

#### ■ Acondicionamiento:

Dividimos la muestra en 3 partes idénticas en peso, aproximadamente  $150 \pm 2 \text{ g}$ , (para poner en las 3 botellas). A continuación, se marcó las botellas de prueba y se llenó aproximadamente el 50% del volumen con agua destilada o desionizada a una temperatura de  $5 \pm 2 \text{ ° C}$  y posteriormente colocamos el árido dentro de la botella en el nivel A (clave 5 de la figura 4.3).

Colocamos la varilla de vidrio con el tubo de goma (firmemente fijado) en la botella y sellamos la botella con el tapón de rosca. Inmediatamente, apoyamos las botellas sobre la máquina de laminación y las sometimos a un movimiento constante.



#### Key

- 1 screw cap, bottle opening diameter  $(30 \pm 5) \text{ mm}$
- 2 rubber tube
- 3 glass rod, diameter  $(6 \pm 1) \text{ mm}$
- 4 glass test bottle
- 5 level A (shoulder)

Figura 4-3. Frasco de prueba con varilla

#### ■ Procedimiento del ensayo:

Ajustamos la máquina rodadora de botellas a una velocidad de rotación dependiendo de la penetración del betún; en el ensayo, la penetración fue superior a  $100 \text{ 1/10 mm}$  a  $25 \text{ ° C}$ , la velocidad de rotación de las botellas será de  $40 \text{ [min]}^{(-1)} \pm 10\%$ . Colocamos las botellas en la máquina de enrollar botellas y comienza el proceso de laminación (durante  $6 \text{ h} \pm 15 \text{ min}$ ), sin exposición directa a la luz solar.

Cuando este proceso finalizó, vertimos el agua de la botella en un vaso de precipitados. Vaciamos el

árido de la botella en un recipiente de prueba y llenamos este con agua dulce (destilada o desionizada) hasta que cubrimos toda la superficie. Si hacemos esto, es más fácil ver el betún y una buena determinación visual de la cobertura del aglutinante en las partículas de áridos.



Figura 4-4. Máquina de rotación de botellas (A) y botella de prueba (B)

Se tomaron las observaciones visuales y se registraron el grado promedio de cobertura de betún de las partículas al 5% más cercano (0%, 5%, 10%, 15%, 20% ...). Utilizamos una lámpara y una lupa para facilitar la observación y estimación.

Es más difícil estimar el grado de cobertura de betún en áridos oscuros que en áridos brillantes. Es fácil confundirse con los áridos oscuros. Registra si se observa un bulto de partículas. Los resultados deben expresar números con cinco factores y siguiendo el siguiente enfoque de la tabla 4.3. Esta tabla muestra el porcentaje de revestimiento de partículas por betún.








						
100%	95%	90%	80%	60%	40%	20%
Degree of particle coating						

Figura 4-5. Grado de recubrimiento de partículas

Desechamos el agua del recipiente de prueba (la siguiente muestra será con agua fresca nueva), devolvimos las partículas de áridos a la botella y volvimos a llenarlas con el agua original del vaso de precipitados.

Las botellas se colocaron en la máquina durante  $18 \text{ h} \pm 15 \text{ min}$ . (Total =  $6 \text{ h} + 18 = 24 \text{ h}$  de tiempo de rodadura).

Si es necesario, el procedimiento de balanceo puede detenerse temporalmente durante la prueba

prolongada para permitir que el procedimiento siga las horas normales de trabajo. Opcionalmente, la observación se puede realizar adicionalmente después de  $(48 \pm 1)$  h y  $(72 \pm 1)$  h de tiempo total de rodadura, pero es muy difícil aglutinar el desmonte, las lecturas después de 96h y 168h.

La norma nos recomienda hacer la evaluación visual entre dos operadores por separado. Así pues, podrán realizar una comparativa de los resultados obtenidos. El resultado del cálculo final será el promedio de las dos determinaciones. Comentar que, si existen más del 10% de grumos en los áridos, los resultados serán inválidos.

#### 4.3.3 Ensayo PN-84/B-06714/22 frente EN 12697-11 (Resultados obtenidos)

##### ✚ Resultados de la prueba de botella rodante

La tabla 4.4 muestra los resultados obtenidos de la prueba de botella rodante.

Áridos	Tiempo	Ensayos realizados	Recubrimiento de asfalto [%]			Promedio de calificaciones [%]	Promedio de visual operadores [%]
			Ejemplo 1	Ejemplo 2	Ejemplo 3		
<b>Granito</b>	6 h	1	15	10	20	15	15
		2	15	15	20	15	
	24h	1	5	5	5	5	5
		2	5	5	5	5	
<b>Basalto</b>	6 h	1	85	90	85	90	90
		2	90	90	85	90	
	24h	1	30	35	25	30	30
		2	30	35	25	30	
<b>Escoria de acero</b>	6 h	1	70	70	65	70	70
		2	70	70	65	70	
	24h	1	15	10	15	15	15
		2	15	10	15	15	
<b>Caliza</b>	6 h	1	85	90	85	85	85
		2	85	90	80	85	
	24h	1	5	30	5	15	15
		2	10	25	10	15	

Tabla 4-3. Resultados obtenidos del ensayo de botella rodante

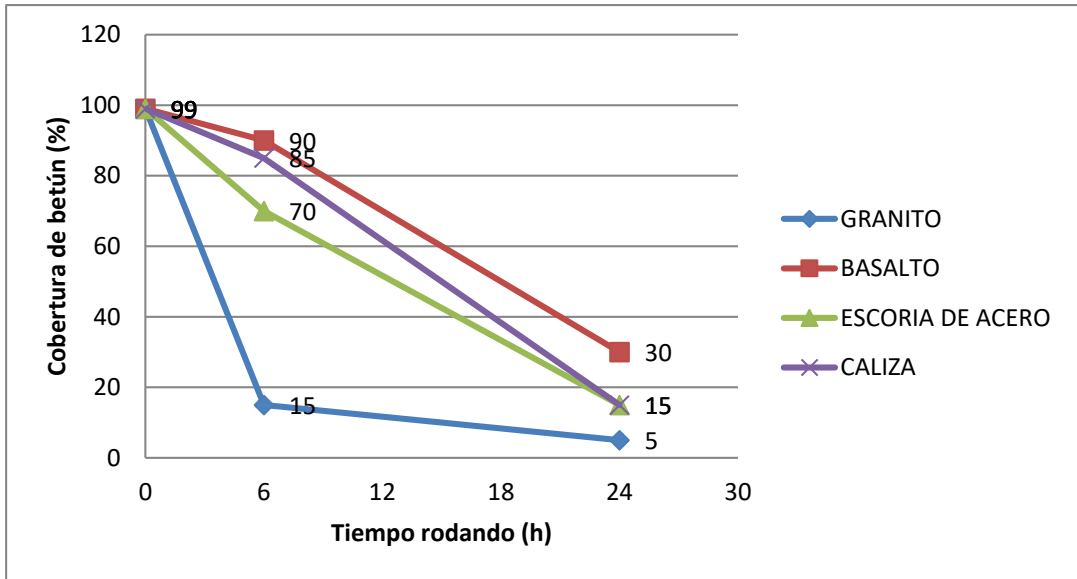


Figura 4-6. Gráfica de resultados obtenidos del ensayo de la botella rodante

En la prueba de adhesión después de 24 horas, disminuyó significativamente en comparación con la adhesión después de 6 horas. Estos resultados se obtuvieron porque el método de la botella rodante es una prueba física del desgaste de la textura del árido. Las partículas se frotran entre sí, con la pared de la botella y con la varilla de vidrio causando una destrucción creciente en la textura del árido. Al evaluar el grado de cobertura de las partículas de asfalto, también notó que la película adhesiva comienza a caer fuera del borde de las partículas. El borde de las partículas es donde el grosor de la película adhesiva es el más pequeño y, por lo tanto, en este punto es más débil y más susceptible de dañarse cuando está en contacto con otras partículas.

Los materiales porosos o las irregularidades de la superficie, como el basalto o la escoria de fabricación de acero, tienen mejores resultados que otros materiales porque el betún está dentro de los poros, pero estos poros se reducen o eliminan después de terminar la prueba de la botella rodante.

Se encontró que después de 6 horas, los áridos con textura irregular tienen muy buenos resultados, pero con textura regular tienen un rendimiento muy bajo debido a la colisión entre partículas. Después de 24 horas, hay micro abrasión y todos los resultados son bajos debido a la pérdida de los poros (similar a la erosión causada particularmente por un río). La erosión entre las partículas causa una textura regular, evitando que el betún se encuentre en los poros.

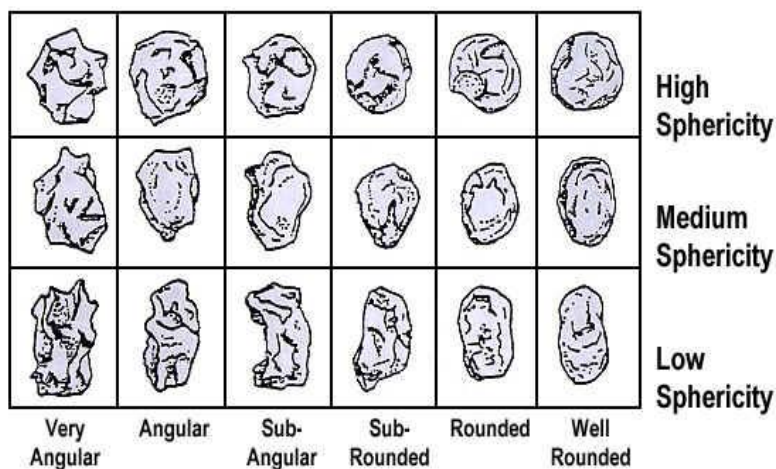


Figura 4-7. Clasificación de la forma de los áridos

Los resultados de la escoria de fabricación de acero son mejores porque tiene una alta esfericidad y es muy angular; estos factores hacen que el betún esté dentro de los poros incluso después del desgaste de la superficie en la prueba de la botella rodante. El basalto tiene una alta esfericidad, pero está bien redondeado, estos factores hacen que el basalto tenga menos poros porque el betún está dentro.

Estas figuras muestran la pérdida de betún en la superficie, son cuatro ejemplos diferentes de áridos:

**Granito:**

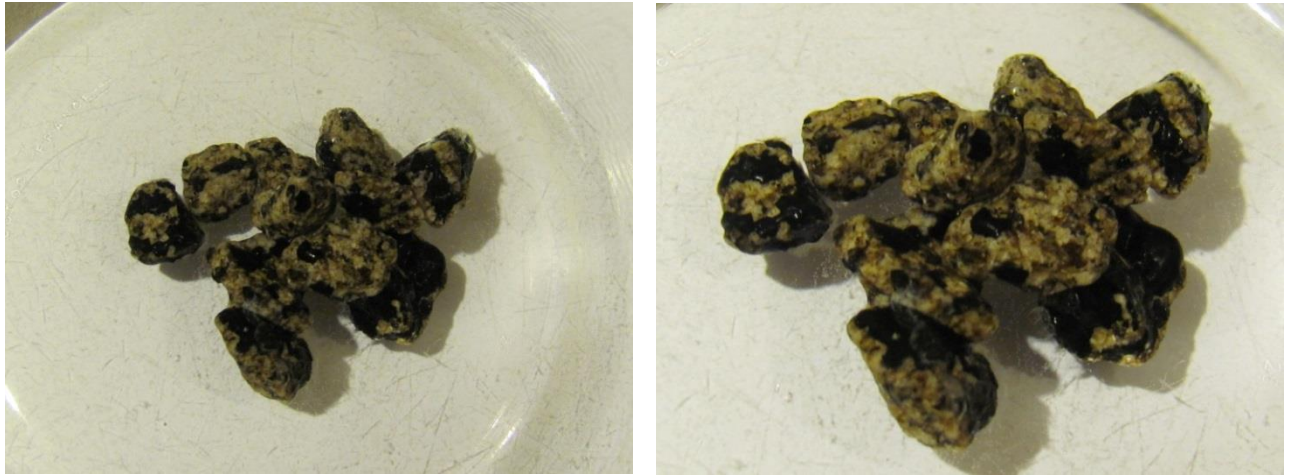


Figura 4-8. Granito después de 6 horas de ensayo

Estas cifras muestran que alrededor del 20% (la botella 3) del árido está cubierta con betún. El granito es la muestra que tiene menos betún después de 6 horas, el promedio es del 15%.



Figura 4-9. Granito después de 24 horas de ensayo

Esta figura muestra aproximadamente el 5% (la botella 3) del árido está cubierto con betún. El granito es la muestra que tiene menos betún después de 24 horas, el promedio es del 5%.

**Basalto:**

Figura 4-10. Basalto después de 6 horas de ensayo

Estas cifras muestran que alrededor del 90% (la botella 2) del árido está cubierta con betún. Basalto y Caliza son las muestras que tienen más bitumen después de 6 horas, el promedio es de 85%.



Figura 4-11. Basalto después de 24 horas de ensayo

Estas cifras muestran que alrededor del 25% (la botella 3) del árido está cubierta con betún. Basalto es que la muestra tiene más bitumen después de 24 horas, el promedio es de 30%.



Escoria de fabricación de acero:

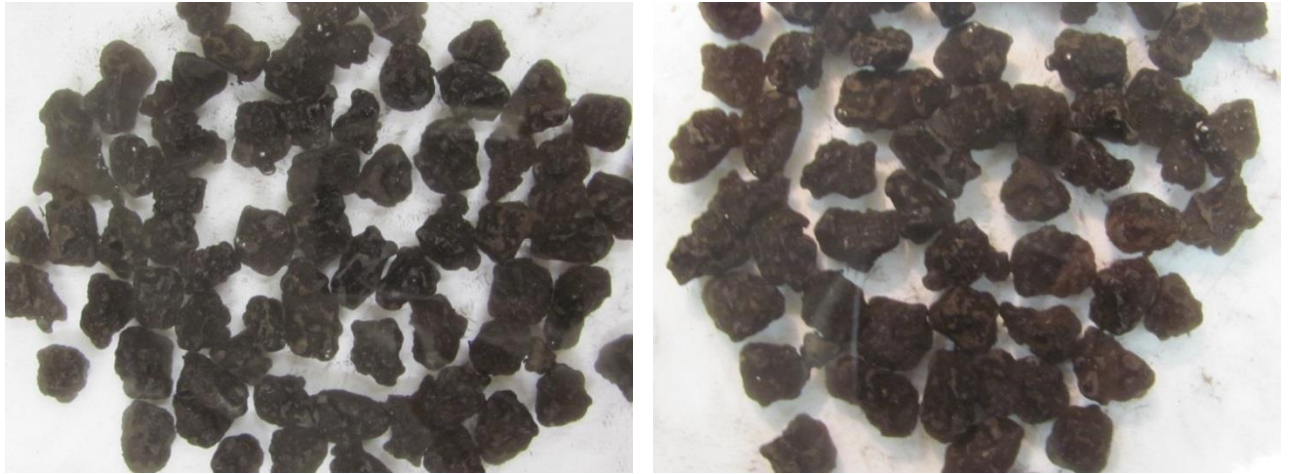


Figura 4-12. Escoria de acero después de 6 horas de ensayo

Estas figuras muestran dos muestras diferentes. La primera imagen con el 70% está cubierta con betún (la botella 1) y en la segunda imagen con el 65% (la botella 3), el promedio es del 70%.



Figura 4-13. Escoria de acero después de 24 horas de ensayo

Estas figuras muestran dos muestras diferentes. La primera imagen con el 15% está cubierta con betún (la botella 1) y en la segunda imagen con el 10% (la botella 2), el promedio es del 15%.

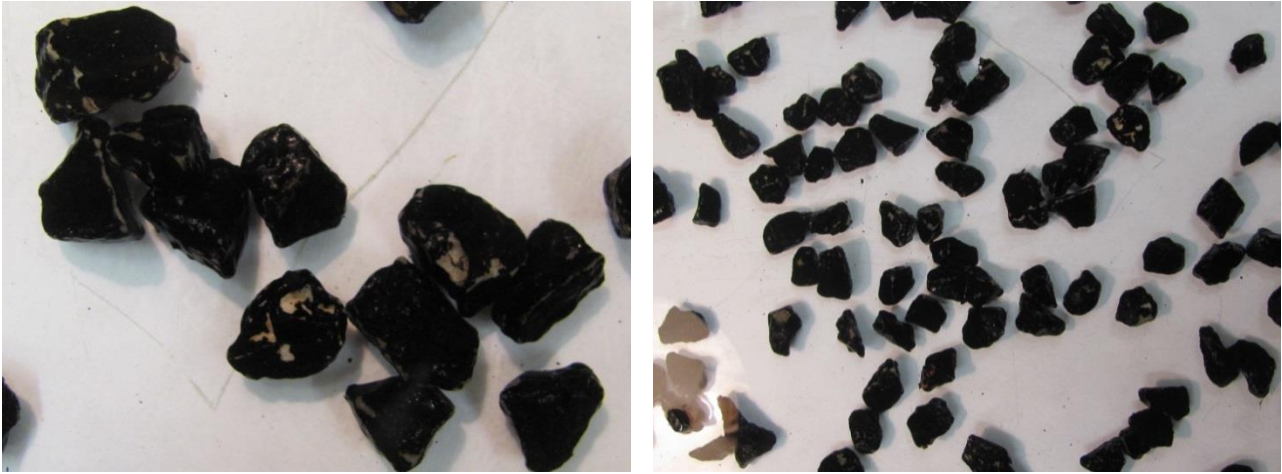
**Caliza:**

Figura 4-14. Caliza después de 6 horas de ensayo

Estas cifras muestran que aproximadamente el 85% (la botella 1) del árido está cubierta con betún. Basalto es que las muestras tienen más bitumen después de 6 horas, el promedio es de 85%.

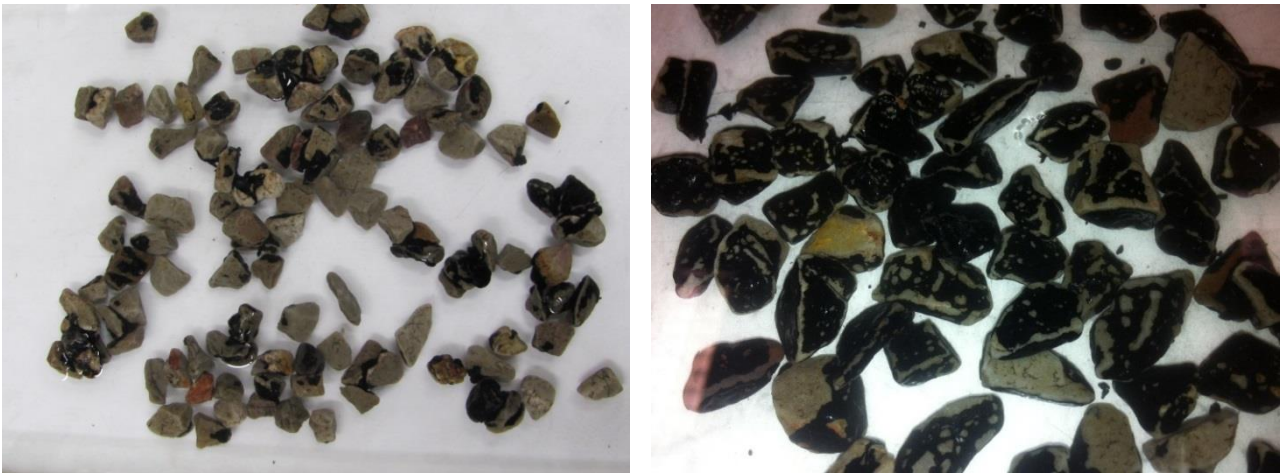


Figura 4-15. Caliza después de 24 horas de ensayo

Estas figuras muestran dos muestras diferentes. La primera imagen con el 5% está cubierta con betún (la botella 1) y la segunda imagen con el 30% (la botella 2). Hay una gran diferencia entre las botellas 1, 3 y 2 porque usamos el mismo proceso (es raro). El promedio es del 15%. Después de 24 horas los áridos tienen micro abrasión.

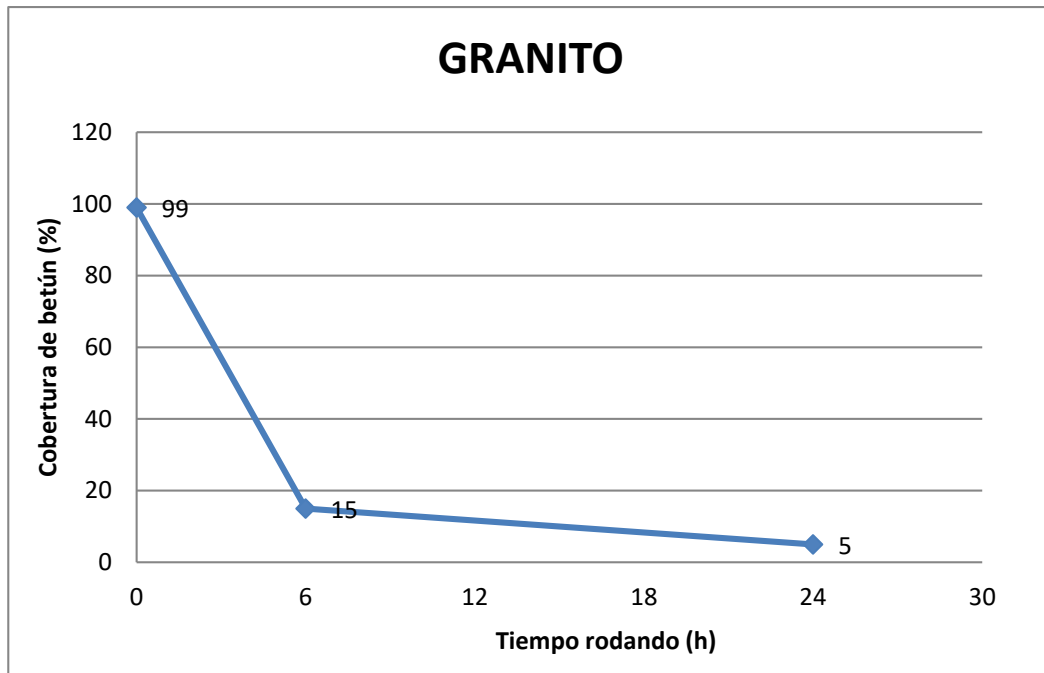


Figura 4-16. Resultado de granito con método de botella

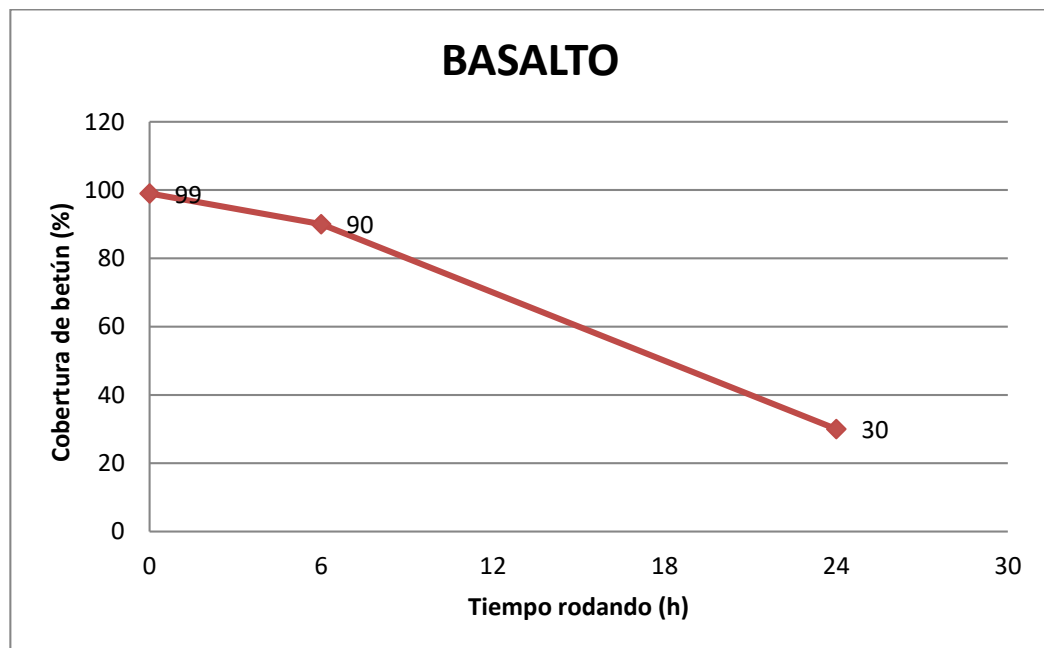


Figura 4-17. Resultado de basalto con método de botella

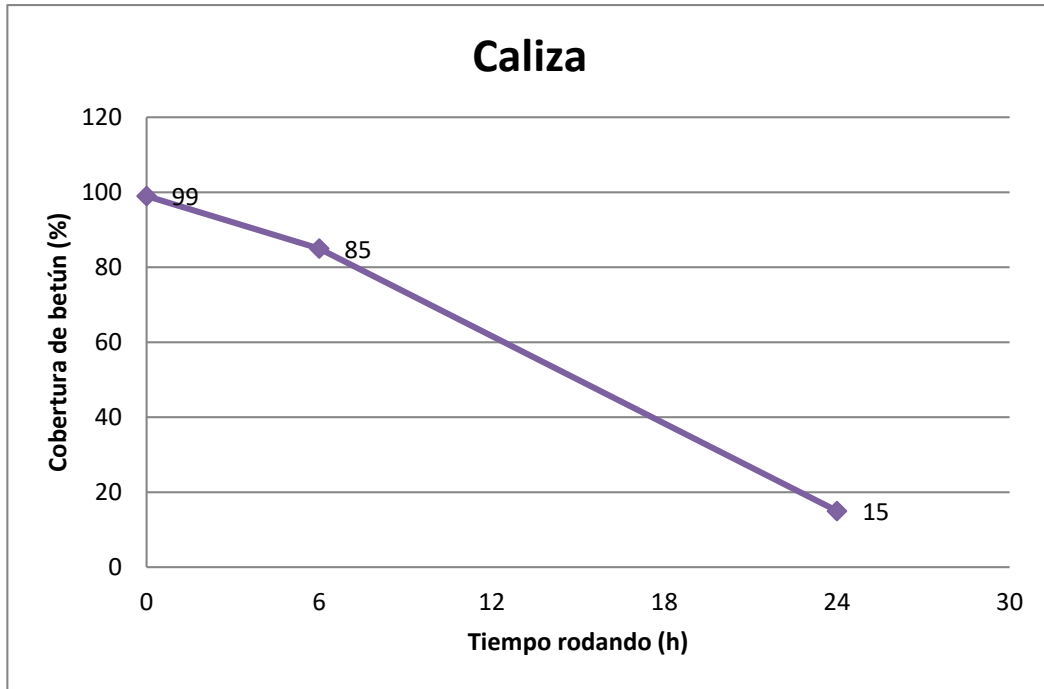


Figura 4-18. Resultado de caliza con método de botella

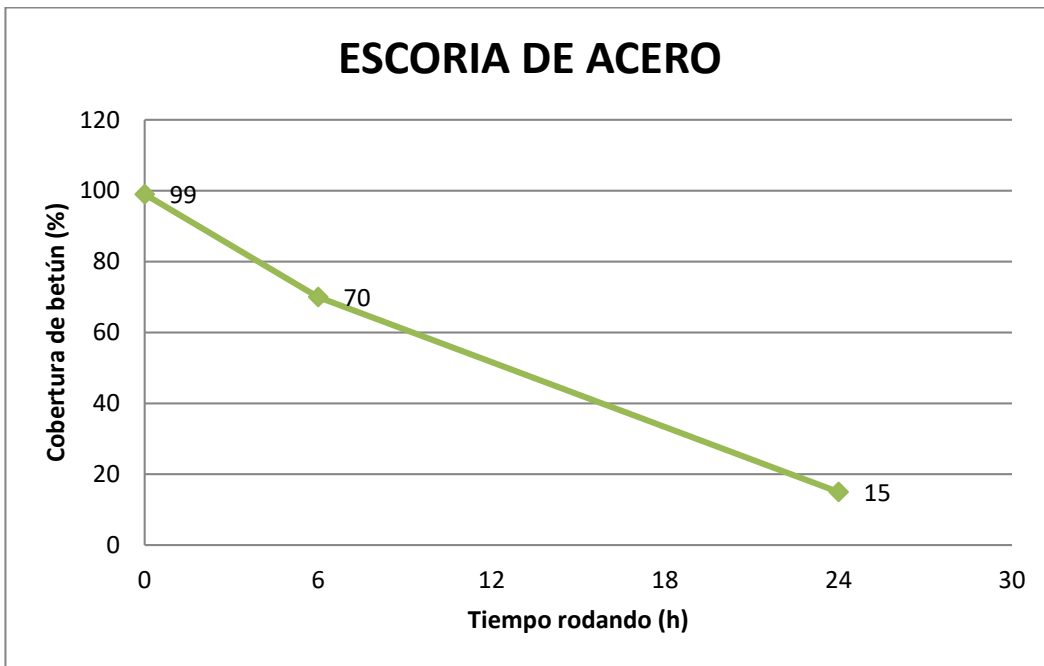


Figura 4-19. Resultado de escoria de fabricación de acero con método de botella

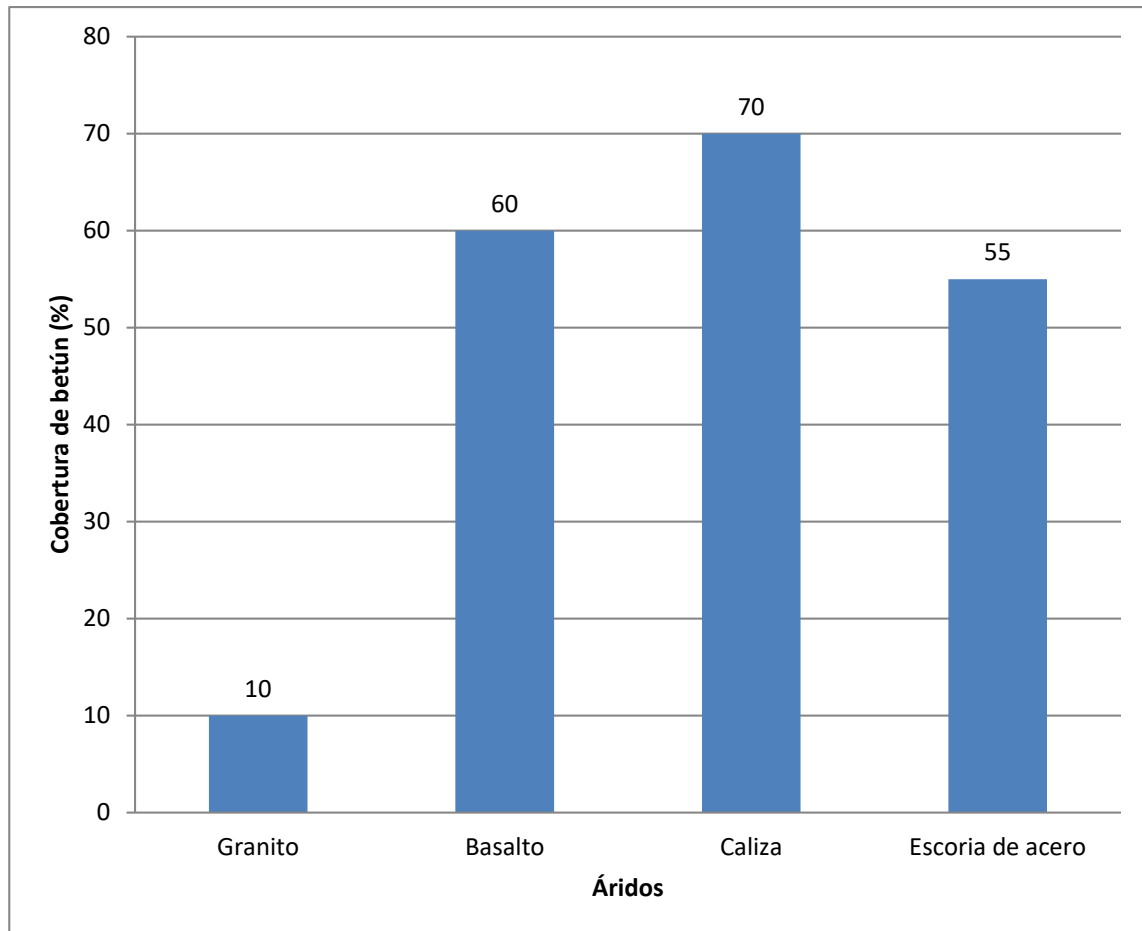


Figura 4-20. Diferencia entre 6h y 24h de ensayo de botella

La precisión de esta prueba aún no se ha establecido oficialmente. Se estima a partir de la práctica normal. Los resultados cercanos a 0 o 100 son más fáciles de determinar visualmente que los resultados de "rango medio" entre 25% y 75%.

El betún se adhiere bien a todos los tipos normales de áridos de carreteras siempre que estén secos y libres de polvo (excepto granito y muy bien con basalto). En ausencia de agua prácticamente no hay problema de adhesión de la construcción bituminosa.

**Resultados de la prueba de ebullición**

Se muestran los resultados obtenidos de la prueba de ebullición en la tabla 4.5.

Áridos	Ensayos realizados	Resultados de los ensayos después de 3 min. hirviendo [%]		Promedio de calificaciones [%]	Promedio de visual operadores [%]
		Ejemplo 1	Ejemplo 2		
Granito	1	20	15	20	20
	2	20	20	20	
Basalto	1	30	30	30	30
	2	25	30	30	
Escoria de acero	1	60	75	70	70
	2	65	70	70	
Caliza	1	5	5	5	5
	2	5	5	5	

Tabla 4-4. Resultados obtenidos del ensayo de ebullición

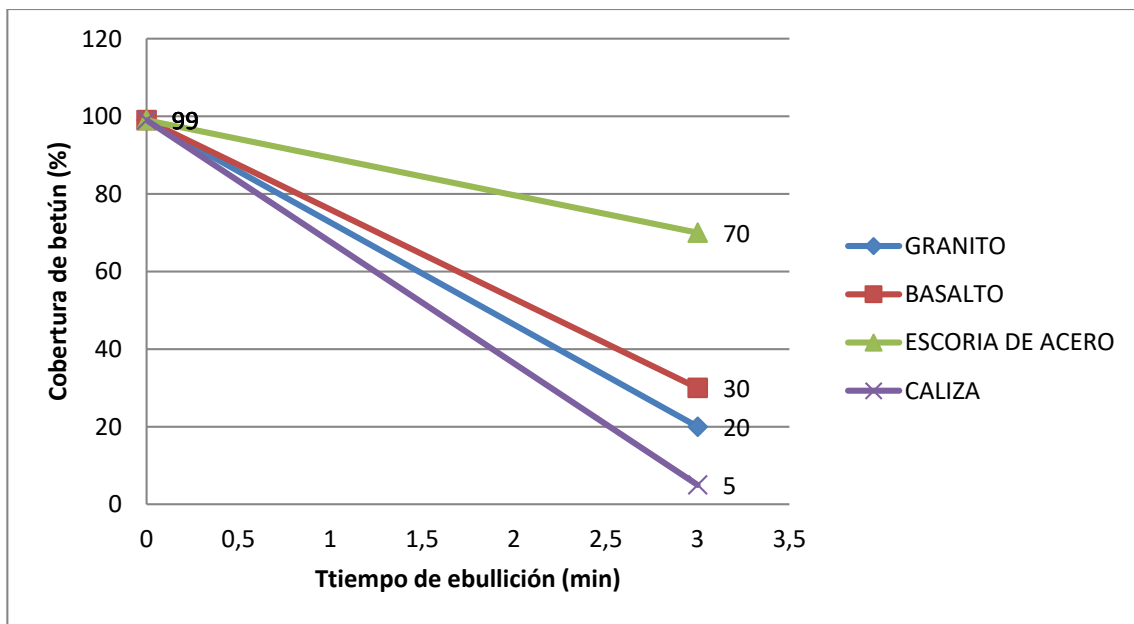


Figura 4-21. Gráfica de resultados del método de ebullición

Estos resultados se obtuvieron porque el método de "prueba de ebullición" es un proceso químico y sólo elimina la superficie del árido de betún.

Esta prueba no daña la textura del árido (sin micro abrasión), antes y después de la prueba, el árido tiene las mismas irregularidades de textura. Los materiales porosos o materiales con textura irregular, como la escoria de basalto o acero, se desempeñan mejor que otros materiales porque el betún está dentro de los poros.

La precisión de esta prueba aún no se ha establecido oficialmente. Se estima a partir de la práctica normal. Los resultados cercanos a 0 o 100 son más fáciles de determinar visualmente que los resultados de "rango medio" entre 20% y 75%.

Estas figuras muestran la pérdida de betún en la superficie. Se muestran cuatro ejemplos diferentes de diferentes áridos:

**Granito:**



Figura 4-22. Granito después de 3 minutos de ebullición – primera muestra

Estas cifras muestran que alrededor del 25% del árido está cubierto con betún.



Figura 4-23. Granito después de 3 minutos de ebullición – segunda muestra

Esta figura muestra que alrededor del 20% del árido está cubierto con betún.

**Basalto:**

Figura 4-24. Basalto después de 3 minutos de ebullición – primera muestra

Estas cifras muestran que alrededor del 25% del árido está cubierto con betún.



Figura 4-25. Basalto después de 3 minutos- segunda muestra

Esta figura muestra que alrededor del 30% del árido está cubierto con betún.



Escoria de fabricación de acero:



Figura 4-26. Escoria de fabricación de acero después de 3 minutos: primera muestra

Estas cifras muestran que alrededor del 65% del árido está cubierto con betún. Se ve muy bien la textura irregular.



Figura 4-27. Escoria de fabricación de acero después de 3 minutos de ebullición – segunda muestra.

Esta figura muestra que alrededor del 70% del árido está cubierto con betún. La escoria de fabricación de acero es la muestra que tiene más bitumen después de 3 minutos de ebullición, el promedio es del 70%.

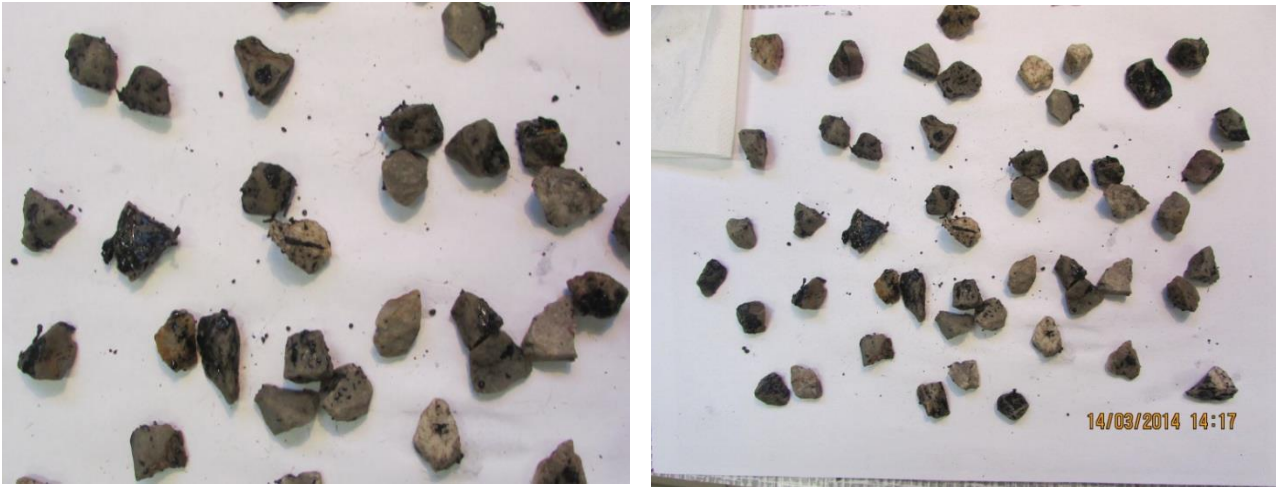
**Caliza:**

Figura 4-28. Piedra caliza después de 3 minutos de ebullición – primera muestra

Estas cifras muestran que alrededor del 5% del árido está cubierto con betún.



Figura 4-29. Piedra caliza después de 3 minutos de ebullición – primera muestra

Esta figura muestra que alrededor del 5% del árido está cubierto con betún. La piedra caliza es la muestra que tiene menos betún después de 3 minutos de ebullición, el promedio es del 5%.

Estudio comparativo utilizando la prueba de botella rodante y la prueba de ebullición.

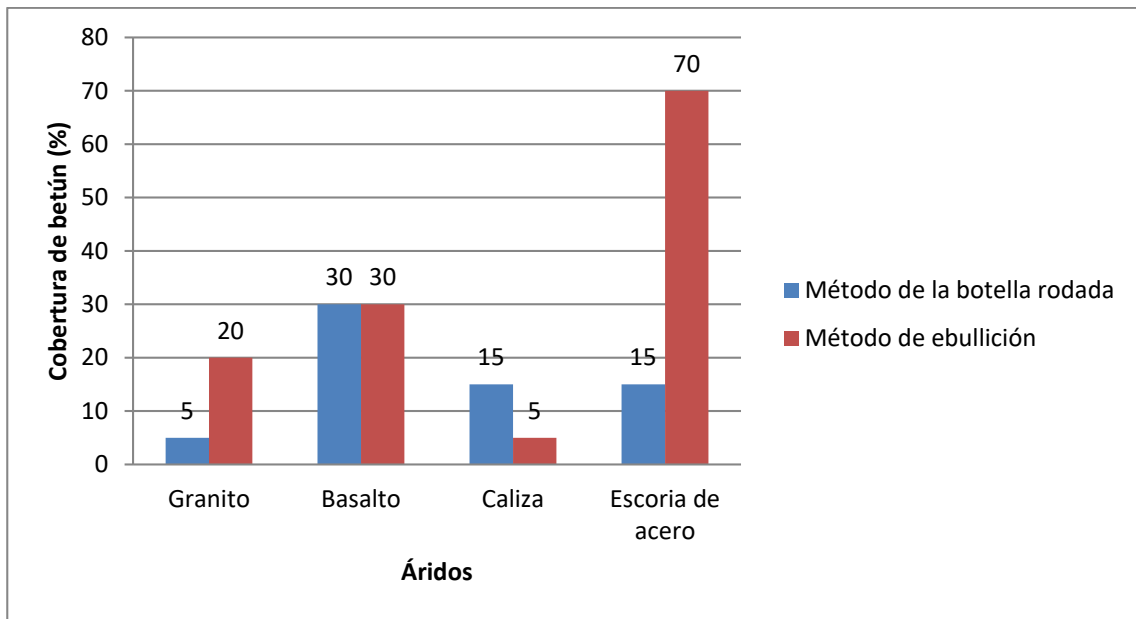


Figura 4-30. Comparación de método polaco y europeo

La investigación y el análisis encontramos que existe una gran variación en los resultados de la adhesión entre el betún y los áridos, dependiendo del método de prueba.

La diferencia entre la prueba europea y la prueba polaca, es que la prueba europea es un proceso físico (las partículas de áridos vibran contra cada una y con una varilla de vidrio que está dispuesta dentro de la botella durante 24 horas) produciendo el desgaste en la textura del árido, dando una textura regular similar a la superficie pulida (micro abrasión); mientras que la prueba de ebullición es un proceso químico en el que no hay desgaste de la textura en una superficie irregular, pero con la ventaja adicional de que el betún se encuentra dentro de los poros. Por ello, se puede concluir que el ensayo polaco ofrece mejores resultados ya que el método de ebullición nunca cambia la textura de los áridos. Sin embargo, es necesario hacer ambos métodos y comparar.

Estas figuras muestran la pérdida de betún en la superficie de diferentes pruebas (prueba de botella rodante y prueba de ebullición). Corresponden a cuatro ejemplos de diferentes áridos:

**Granito:**



Figura 4-31. Comparación de granito después de la prueba de botella rodante (6h, 24h) y después de la prueba de ebullición

**Basalto:**

Figura 4-32. Comparación de basalto después de la prueba de botella rodante (6h, 24h) y después de la prueba de ebullición

**Caliza:**

Figura 4-33. Comparación de caliza después de la prueba de botella rodante (6h, 24h) y después de la prueba de ebullición

**Escoria de fabricación de acero:**



Figura 4-34. Comparación de la escoria de fabricación de acero después de la prueba de botella rodante (6h, 24h) y después de la prueba de ebullición

Un factor muy importante que afecta a las adherencias, es la regularidad o irregularidad de la superficie del árido porque dentro de los poros es donde el betún se adhiere mejor.

Las siguientes imágenes se tomaron del microscopio de barrido (aumentos X200) y es posible ver las características petrográficas de las rocas y su textura.

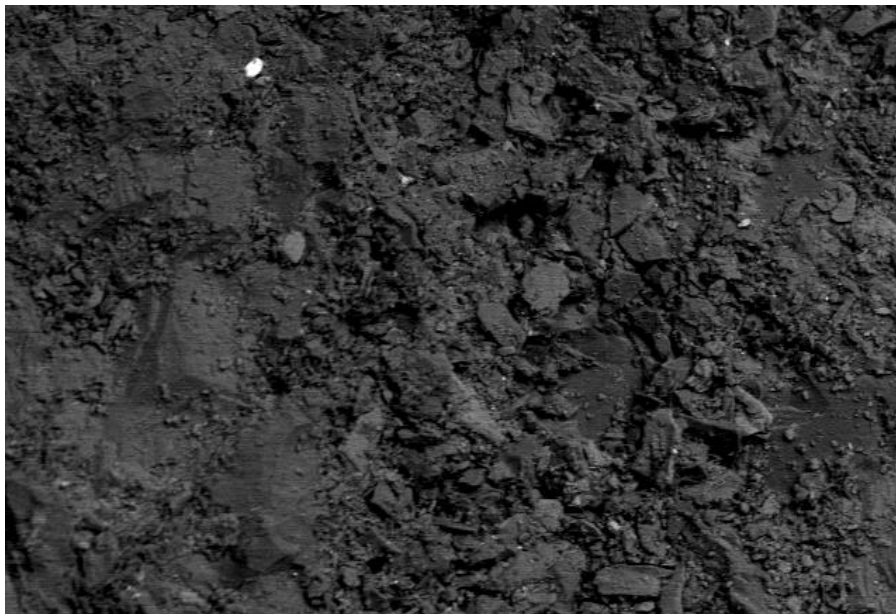


Figura 4-35. Superficie de granito con microscopio

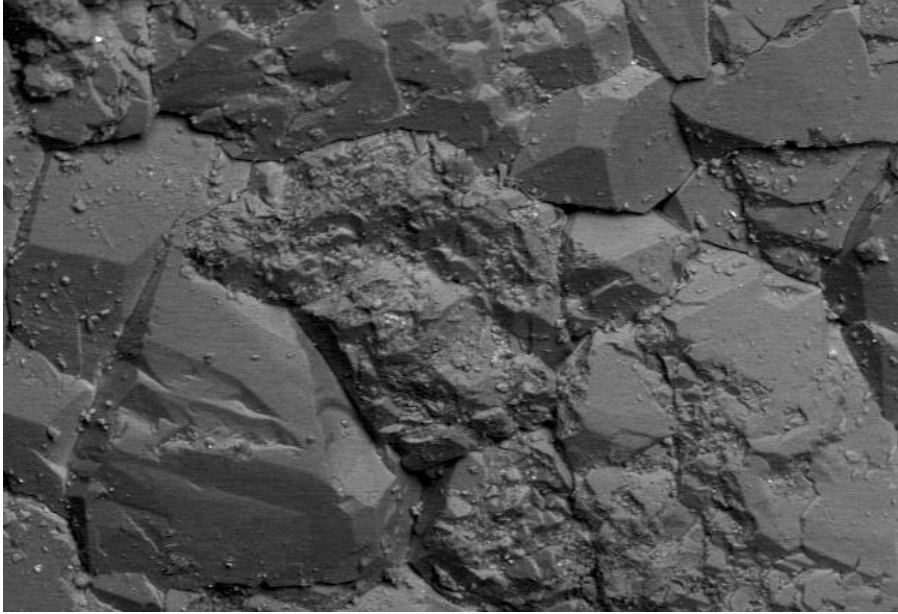


Figura 4-36. Superficie de caliza con microscopio

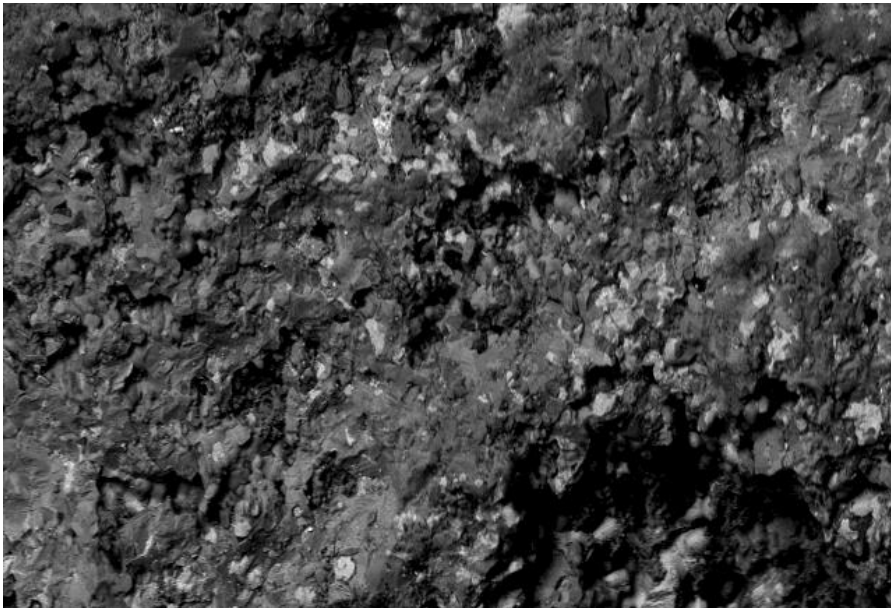


Figura 4-37. Superficie de escoria de acero con microscopio

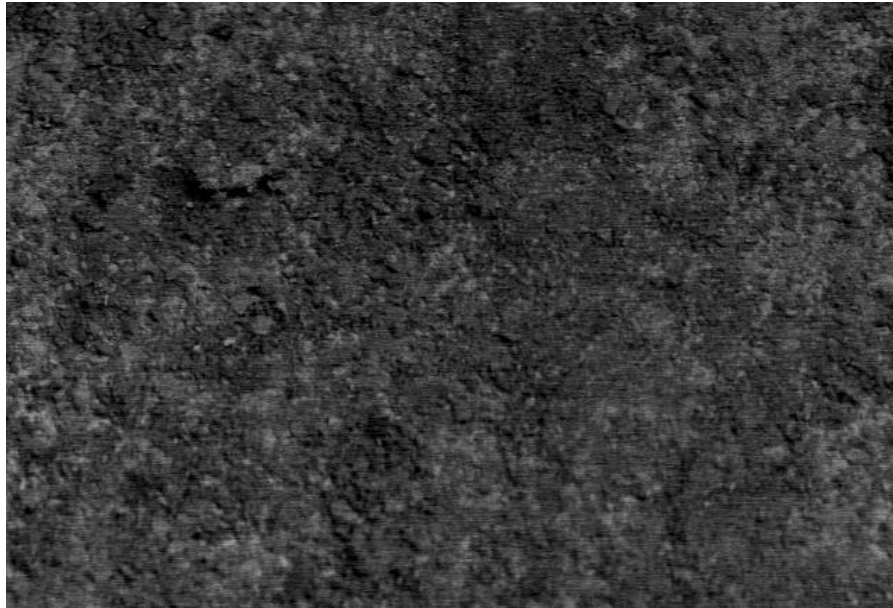


Figura 4-38. Superficie de escoria de acero con microscopio

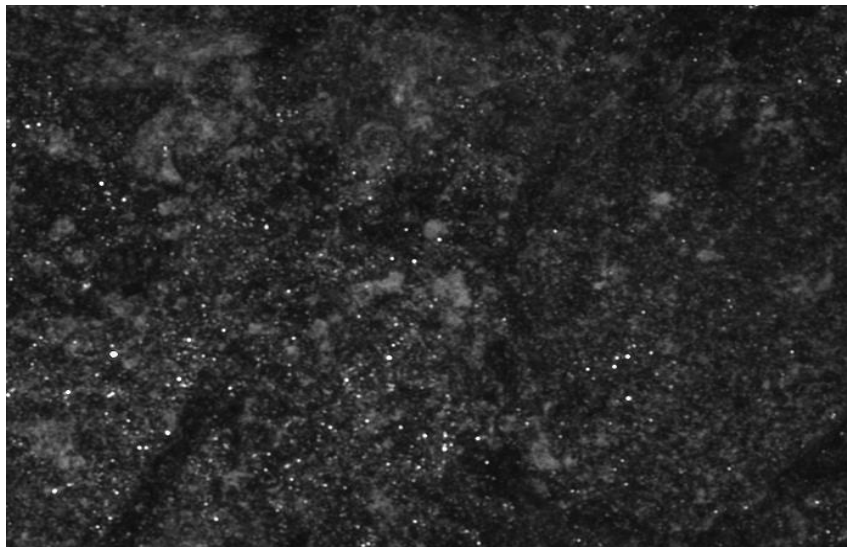


Figura 4-39. Superficie de basalto con microscopio

#### 4.4 Propuestas para Mejorar la Adhesión y Características de una Mezcla

La sociedad, cada día es más exigente en relación a la calidad de cualquier tipo de producto, por lo que, una mezcla asfáltica ha de formularse, fabricarse, transportarse y extenderse en obra, cumpliendo todos los requisitos técnicos marcados por las normas europeas y españolas.

Respecto a los componentes de una mezcla:

Los áridos han de cumplir con pleno rigor el apartado 3.4., lo cual es básico para que exista una buena adhesión, se ha de recalcar que la superficie exterior del árido se ha de encontrar totalmente libre de impureza de polvo y sin humedad, ya que pueden originar una reducción de la interacción árido-betún.

El porcentaje de filler ha de estar muy controlado. Por un lado, el filler de recuperación es el que se encuentra adherido a los áridos, es el propio polvo que trae el material de la cantera (teóricamente debe de venir sin polvo para la fabricación). Por otro lado, el filler de aportación es el procedente de fábricas de cemento (para mezclas rígidas) o de micronizados de carbonato cálcico (para mezclas flexibles). El filler de aportación se añade a la mezcla en función de los porcentajes que nos marque la fórmula de trabajo.

El betún, es el principal elemento que puede ayudarnos a aumentar la adhesión y a crear mejores mezclas porque es un componente alterado en laboratorios en función de nuestras necesidades. El betún proviene de la decantación del crudo y separado por densidades, por lo que una vez extraído, se le pueden añadir elementos y aditivos con el fin de mejorar las propiedades del mismo. De esta forma se pueden crear betunes de alto módulo (betunes modificados) con mayor dureza a la penetración y más elasticidad que lo podemos conseguir con un aporte de polímeros de caucho.

Estos betunes modificados consiguen un producto con una estructura microscópicamente homogénea y que garantiza la estabilidad de la mezcla.

Están diseñados principalmente para adaptar las carreteras a las mayores exigencias del tráfico actual, los betunes modificados con polímeros aportan grandes ventajas en el comportamiento de las mezclas bituminosas, entre ellas:

- Mayor cohesión, lo que permite estructuras granulométricas más críticas
- Mayor resistencia a la fatiga, disminuyendo el riesgo de fisuración
- Mayor durabilidad en servicio, ya que se consigue una mayor resistencia al envejecimiento en condiciones adversas
- Mayor adhesividad a los áridos
- Incremento del intervalo de temperaturas de servicio
- Mayor resistencia a deformaciones plásticas (roderas)

Por su configuración y comportamiento reológico, en los betunes modificados con polímeros no pueden aplicarse las mismas recomendaciones de uso que en los betunes convencionales. Por ello, además de por su elevado coste, hay muchas empresas dedicadas a la fabricación de mezclas bituminosas que no quieren emplearlo





## 5 PROBLEMÁTICA ACTUAL EN SEVILLA

---

*Locura es hacer la misma cosa una y otra vez esperando obtener diferentes resultados.*

*- Albert Einstein -*

Introduzco este punto con la frase arriba mencionada por Albert Einstein porque en mi opinión es lo que está ocurriendo en la ciudad de Sevilla, es decir, hay diferentes puntos en la ciudad cuya capa de rodadura falla por los mismos motivos, en lugar de buscar una solución definitiva, se reparan y ejecutan siempre de la misma forma y con la misma mezcla asfáltica con la que se ha producido el fallo anteriormente.

Los problemas que ocurren son principalmente dos. Por un lado, las deformaciones plásticas tipo roderas en las paradas de autobús debido a los esfuerzos horizontales creados en el pavimento al frenar los autobuses y, por otro lado, la demolición de la capa de rodadura en los carriles por donde circulan los coches de caballos, justo donde pisan los equinos.

### 5.1 Deformaciones debidas al tráfico de autobuses

Las deformaciones tipo roderas se producen debido a la escasez de capacidad portante. Si se describe el fenómeno podemos decir que el pavimento va acumulando una pequeña deformación plástica, pero no permanente cada vez que circule un vehículo. Dicha deformación consiste en una inclinación y un desplazamiento lateral de la mezcla, pudiendo ocurrir en la capa de rodadura o en capas base.

Las roderas suelen ocurrir en zonas cálidas, por eso cuando llegan las intensas temperaturas veraniegas a Sevilla, se producen de forma continua, ya que al alcanzar el pavimento temperaturas de 65°C (10-20°C por encima de las temperaturas del ambiente), se producen exudaciones (si existe un exceso de betún) y posteriormente un reblandecimiento de la mezcla que, al paso de los vehículos comienza a deformarse.

El motivo por el que ocurren normalmente en las paradas de autobuses es porque es un vehículo pesado por lo que los esfuerzos que transmite al pavimento son mayores que un vehículo ligero, además es el momento en el que se produce la frenada del autobús originando unos esfuerzos horizontales que llegan a superar en magnitud a los verticales.



Figura 5-1. Deformaciones-roderas originadas por la rodadura de autobús (c/Palos de la Frontera y c/Virgen de Luján).



Figura 5-2. Roderas debidas al fallo de la capa de rodadura. (Alejandro Padilla, estudio UPC)

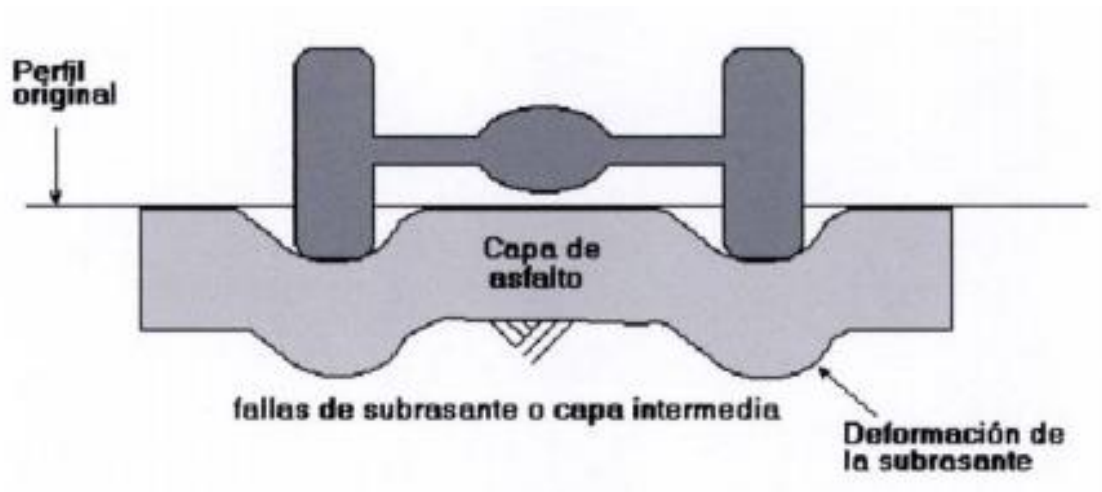


Figura 5-3. Roderas debidas al fallo en la subrasante. (Alejandro Padilla, estudio UPC)



Figura 5-4. Exudación por exceso de betún



Figura 5-5. Deformaciones, fisuras y baches por pérdida de capacidad portante en parada de bus (Av/ Menéndez Pelayo)

En las siguientes imágenes vamos a estudiar los esfuerzos y deformaciones desde un punto de vista crítico mediante un análisis teórico, suponiendo la aplicación de cargas originadas por ruedas con presión y circulación a velocidad constante. Hemos de señalar que las capas del firme, sufrirán cargas dinámicas de diferente magnitud, originadas por el tráfico.

Los esfuerzos (normales y cortantes) son transitorios y cambian con el tiempo conforme avanza la carga.

Los esfuerzos cortantes cambian de sentido conforme avanza la rodadura del vehículo sobre el punto de estudio.

El estado de esfuerzos experimentado en el punto P, debido a una carga en el punto A es, que actúan tanto los esfuerzos cortantes como los esfuerzos normales (ver “a”), cuando la carga se mueve al punto B, los esfuerzos cortantes son nulos y únicamente actúan los esfuerzos normales (ver “b”), en este punto se tiene un estado triaxial de esfuerzos, debido a que sólo se presentan esfuerzos normales, por último, la dirección de los esfuerzos cortantes originados en el punto C, es contraria a la dirección de los esfuerzos originados en el punto A (ver “c”).

A medida que el vehículo se acerca al punto P, el esfuerzo cortante se incrementa hasta llegar a un máximo para luego decrecer hasta un valor de cero, en ese momento el esfuerzo vertical es máximo negativo, para después decrecer y llegar a cero; describiendo con este comportamiento una onda senoidal completa. (Lekarp and Dawson, 1997) y (Federico París Carballo, 1998, Teoría de la Elasticidad).

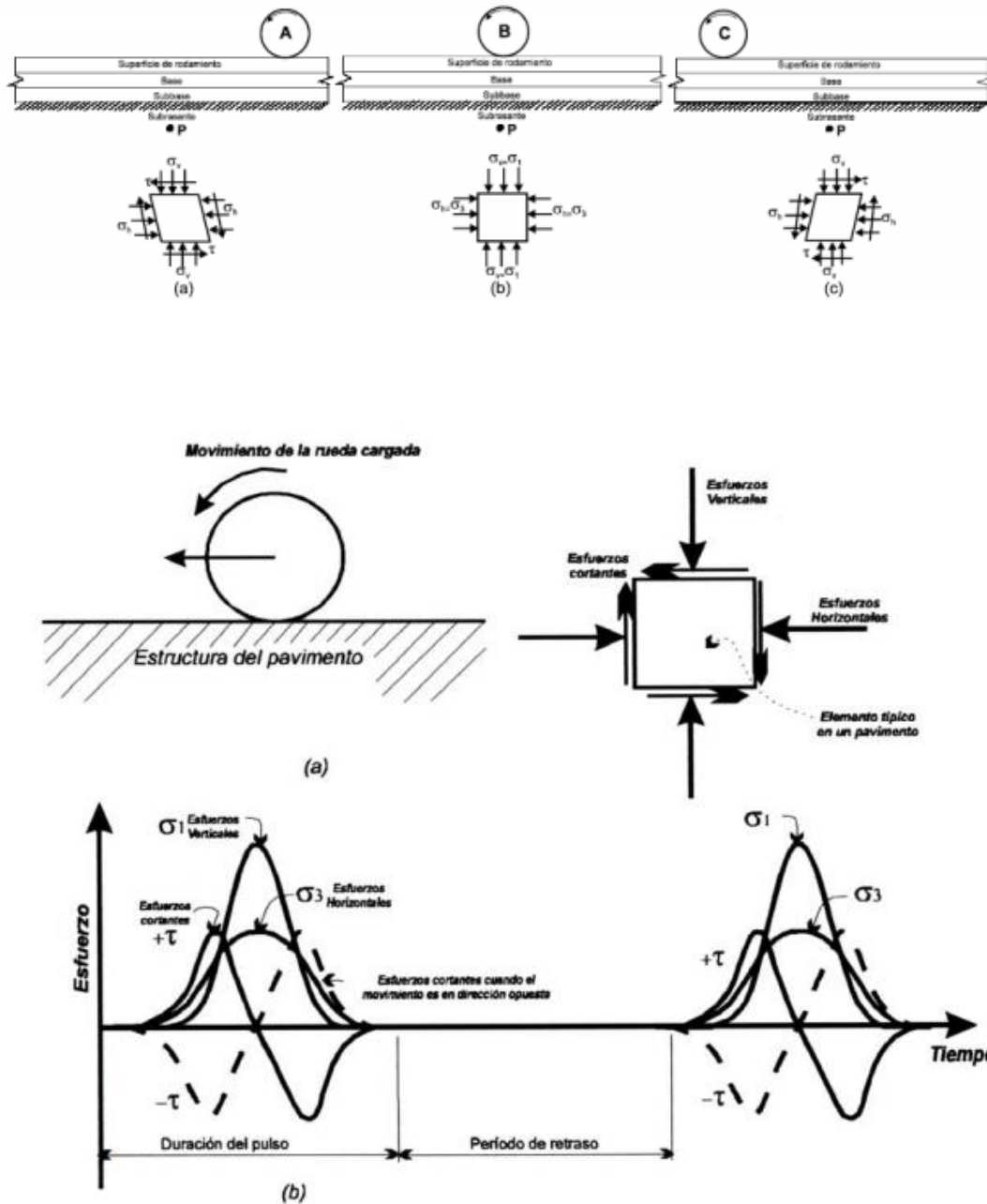


Figura 5-6. Estado de esfuerzos en un pavimento debido al movimiento de una rueda. (Federico París Carballo, 1998, Teoría de la Elasticidad)

## 5.2 Deformaciones debidas al tráfico de caballos

Las deformaciones debidas a la circulación de equinos por las vías para vehículos de motor no son muy comunes en todas las ciudades de España, ya que por regla general no hay caballos en el centro de las ciudades o un número mínimo que apenas producen daños notables en la calzada.

El problema de la ciudad de Sevilla, es el elevado número de coches de caballos dedicado a paseos turísticos por el centro, lo cual hace que cualquier alteración que estén produciendo las pisadas de los equinos aparezca muy rápido en el tiempo, debido al gran número de caballos que pasan por un mismo punto.

Realmente la palabra que define lo que ocurre en estos casos no es deformación del pavimento, es más bien

demolición del pavimento. Esta demolición se origina con cada pisada de los equinos y no en la superficie que abarca la superficie o el perímetro de las herraduras, concretamente se produce con las vidias que llevan incorporada cada herradura en los talones o apoyos del caballo.

Desde que los caballos son herrados y existe el asfalto se mantiene este problema. En superficies con cemento o con hormigón el caballo herrado tiene un gran riesgo de sufrir resbalones, lo que va ligado a caídas, raspones y torceduras. Dependiendo de la superficie por donde vaya a transitar el animal se piensa en usar vidias, o no usarlas. Por ejemplo, caminar sobre una superficie como tierra no necesita el empleo de vidias, en cambio caminar sobre una superficie como asfalto, si necesita vidias porque estas proporcionan gran estabilidad y seguridad al caballo, evitando así sustos al jinete.

En la figura 5.45. se aprecia perfectamente cómo evoluciona el daño en el pavimento. La imagen superior izquierda, hace referencia a un pavimento con días desde su extendido y comienza a marcarse. La imagen superior derecha, refleja la pérdida de superficie, tras el inicio de la demolición, dejando el centro del carril (por donde va el caballo) con una deformación convexa. En la imagen inferior podemos apreciar perfectamente como la demolición es completa, llegando a ocasionar baches peligrosos para el tráfico rodado, en especial para motos.

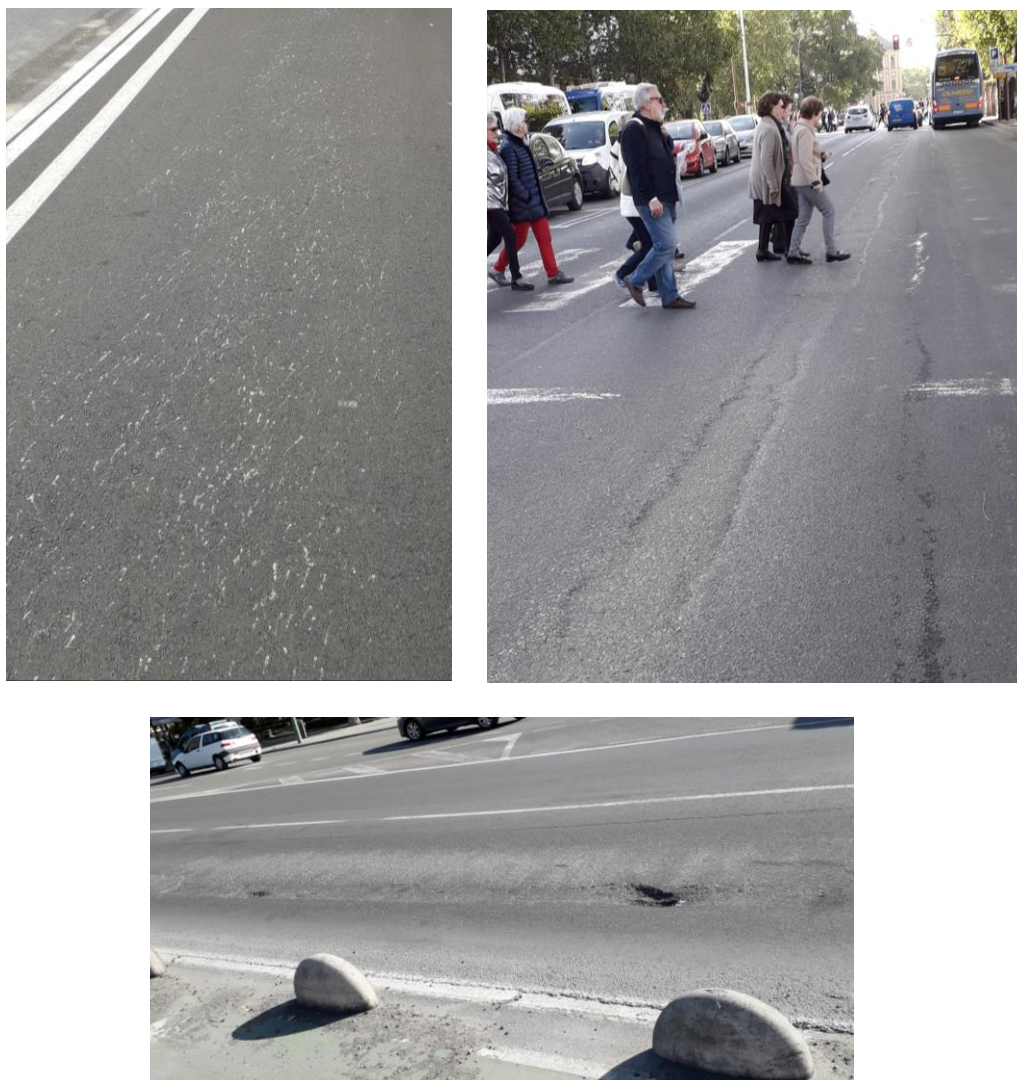


Figura 5-7. Deterioro del pavimento originadas por caballos (c/ Paseo de las Delicias)



Figura 5-8. Deterioro del pavimento originadas por caballos, incluso desaparición de señalización horizontal (c/ Palos de la Frontera).





Figura 5-9. Deterioro del pavimento asfáltico y de adoquines de granito originadas por caballos (Parque María Luisa).



Figura 5-10. Deterioro del pavimento originadas por caballos (Av/ El Cid)

Las Vidias son una especie de tacos o conos que se pueden implementar en las herraduras de los caballos. Están hechas de un material moderno extremadamente resistente, de carburo de wolframio o carburo de tungsteno, cuya composición es el wolframio y el carbono. Éste es un compuesto intersticial cuya característica principal es su dureza y resistencia. De ahí viene su nombre vidia, del alemán ‘widia’, que es la abreviatura de ‘wie diamant’ (en español: como el diamante).

El motivo por el que el nivel de deterioro es muy elevado en un corto periodo de tiempo, es muy simple. Un caballo pesa unos 400kg-500kg, por lo que las vidias se convierten en las encargadas de transmitir ese peso, mediante una carga puntual (esfuerzo vertical), concentrada en una superficie mínima que es la vidia.



Figura 5-11. Herraduras con vidias

En la ciudad de Sevilla, la Gerencia de Urbanismo, propuso a los dueños de los coches de caballos, sustituir la tipología de herradura por una de goma, de forma que los caballos no se resbalasen y el pavimento no acusara tanto el paso de los caballos. Dicho cambio de tipología de herraje sería abonado por la Gerencia de Urbanismo, pero la respuesta a la propuesta realizada a los cocheros fue un “no” rotundo. Por lo que, la solución al problema habrá que buscarla en la tipología de Mezcla Asfáltica.



Figura 5-12. Herraduras de goma para evitar empleo vidias



## 6 ALGUNAS IDEAS PARA EL FUTURO DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

---

*Si no sabes hacia qué puerto zarpa tu barco, ningún viento te será favorable.*

*- Séneca -*

Para finalizar el proyecto, me gustaría resaltar el papel de la ecología de gran importancia en la sociedad actual, por lo que pienso que hemos de considerar que será el futuro de las vías de desarrollo de las mezclas asfálticas.

Toda fabricación de mezcla tiene que coger el camino de desarrollo hacia la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, es por ello que pienso que el futuro serán las mezclas asfálticas templadas con betunes modificados con polvo de neumático y con un alto porcentaje de árido procedente del fresado de firmes.

Al bajar la temperatura de fabricación de 170 ° Ca 115°C, reducimos de forma considerable las emisiones de CO<sub>2</sub>, al igual que si empleamos áridos reciclados y no son extraídos de cantera únicamente para la fabricación de mezclas. El árido reciclado conlleva el empleo de menos dotación de betún, ya que lleva adherido el betún original que al calentarse se fundirá y se mezclará con el nuevo betún que se incorpore a la mezcla. Añadir polvo de neumático dará mayor elasticidad a la mezcla y conseguimos dar uso a los neumáticos usados.

¿Por qué usar mezclas templadas y no mezclas frías?

En mi opinión y analizando resultados de tramos de pruebas de investigadores, el comportamiento de las mezclas templadas es mucho mejor y con la ventaja que las empresas especializadas no necesitan comprar una planta de fabricación diferente, ya que lo único que se haría es bajar la temperatura de fabricación.

Al bajar la temperatura, si se usase un betún convencional la mezcla se convertiría en un material imposible de trabajar porque está muy duro, es por ello que el betún ha de ser modificado con polímeros.

Respecto al tema de fresado, sí que se ha de hacer una pequeña inversión por parte de las empresas especializadas porque tienen que añadir nuevos silos para una buena clasificación del material y un tromel para calentar el fresado aparte del árido de cantera.

Con este tipo de mezcla templada, conseguimos reducir consumo de electricidad, gasoil, betún, áridos de cantera y CO<sub>2</sub>.



## 7 CONCLUSIONES

*Nunca me he tenido por gran ingeniero o inventor,  
solamente me considero un promotor y agitador de  
ideas.*

*- Enzo Ferrari -*

La afinidad del árido con el betún juega un papel muy importante en la durabilidad de un Hormigón Bituminoso. Si la adherencia existente es buena, se obtendrá una mezcla asfáltica con alta resistencia al daño que pueda producir el agua, hielo, condiciones climáticas adversas, procesos de envejecimiento, etc.

El estudio de adherencia realizado, se ha compuesto de dos métodos (la prueba de botella rodante y la prueba de ebullición). Cada método separa el árido de betún de diferentes maneras, de modo que los resultados fueron diferentes. La evaluación de la adherencia con un solo método no sería correcta, por lo que debemos al menos realizar los dos métodos para poder contrastar resultados.

La investigación y análisis han llevado a las siguientes conclusiones:

1- Los áridos procedentes de la escoria de fabricación de acero y el basalto se han caracterizados por una buena adhesión con el aglutinante al finalizar los ensayos como indica la norma., (15%, 30%) según la prueba de botella rodante y (70%, 30%) según el método de ebullición.

2- Al finalizar las dos tipologías de ensayos, se aprecia como los resultados han sido mejores para el método de hervido que para método de la botella. El estudio mostró excelentes propiedades adhesivas en el árido procedente de escoria de acero, ya que se mantenía entorno a un 70% de cobertura de betún del árido tras el ensayo.

3- Los porcentajes de betún obtenido en el método de la botella, son menores porque existe una rotación mecánica que origina el roce entre los bordes afilados de la muestra, produciéndose así una micro abrasión. Los porcentajes de betún obtenidos en el método de ebullición fueron mejores porque es un proceso de químico.

5- Se ha demostrado que la adhesión es menor en áridos como el granito con un gran contenido en su composición química de SiO<sub>2</sub> (dióxido de silicio) y que la adhesión es mayor en áridos bajos en SiO<sub>2</sub> como en la escoria de acero. Este último muestra resultados muy óptimos de adhesión árido-betún, gracias a su estructura porosa.

Según los ensayos realizados el árido más recomendado para la construcción de carreteras sería la escoria de acero, ya que esta proporciona una mayor durabilidad al pavimento, pero al mismo tiempo que ofrece tales ventajas, tiene desventajas;

-La densidad, ya que pesa mucho más que un árido procedente de cantera. Al tener mayor densidad no se obtendrían buenos rendimientos en la logística.

-El precio, ya que una "tn" de material es más costosa que un árido de cantera.

-Al comprar el material en los altos hornos de fundición, te venden el material sin clasificar, por lo que habría que pasarlo por tamices para apartar las granulometrías que nos encajen en la fórmula de trabajo que tenga la mezcla que se desee fabricar.

-Su mayor desventaja es el consumo de betún (el componente más costoso de una mezcla), ya que, debido a los poros, necesita mayor porcentaje de betún para envolver todo el árido. Para hacernos una idea, una mezcla convencional ronda un 4,5% de betún, pues con este árido podríamos alcanzar un 6,5% para que todas las partículas del árido queden bien cubiertas.

Debido a estas desventajas, el basalto resulta más apropiado por su bajo coste frente a la escoria y buenas propiedades para la construcción de carreteras, ya que pertenece a la familia de las rocas ígneas como viene siendo la ofita.

Lo que ocurre con el basalto es que tiene un origen metamórfico-magmático que es difícil de localizar en Andalucía por lo que habrá que recurrir al siguiente grupo de árido que es la Caliza, la cual es muy común, y los precios de venta en canteras son asequibles, ya que su extracción-machaqueo-clasificación es económica (si lo comparamos con por ejemplo con canto rodado de río), pero con el inconveniente de tener un elevado coeficiente de desgaste de los ángeles (>30) y un mal CPA (coeficiente de pulimento acelerado).

Con todo esto concluyo, la elección de un material u otro se basa en los costes, pero que las dos tipologías con las que hemos resuelto son las recogidas en el PG3, áridos calizo (capas base e intermedias) y áridos ofíticos (capas de rodadura).

Para el caso concreto de la problemática existente en la ciudad de Sevilla con los caballos y autobuses, creo y estoy convencido que la solución es la misma para ambos casos, es decir, creo que habría que extender la mezcla bituminosa adecuada en los carriles por donde transiten los caballos, circule el autobús y en paradas de autobús.

Se podría pensar que, aplicando los resultados de los ensayos realizados en este estudio, podríamos solventar el problema introduciendo un árido procedente de la escoria de fundición, aunque los costes sean más elevados a la hora de ejecutar la obra, pero a futuro, será más económico para la Gerencia de Urbanismo al no tener que gastar más dinero en reparar de forma continua los mismos puntos. El problema se encuentra que esa sustitución de árido no es posible solución, ya que el árido de escoria de fundición no tiene la característica de ser resistente. Si golpeamos una partícula con un martillo, se deshace.

Actualmente, la Gerencia de Urbanismo emplea en las calles afectadas una base de arena-betún para tapar cualquier fisura o desperfecto existente en el pavimento. Sobre esa base, se aplicará una capa de roda dura tipo SMA 11 ("Stone Mastic Asphalt" mezcla discontinua, con tamaño máximo de árido 11,2mm), con un 6% de betún modificado tipo PMB45/80-65, betún muy costoso y con un elevado porcentaje frente a otro tipo de mezclas. Es por ello y por los siguientes aspectos negativos, pensar que no se está extendiendo la mezcla idónea para solventar la problemática existente. Estos aspectos negativos son:

Por un lado; al ubicarse Sevilla en una zona de temperaturas altas, se provocarán exudaciones y deformaciones plásticas debido al alto contenido en betún extendido (capa base de arena-betún y capa de rodadura), ya que el betún se encuentra en estado sólido hasta que se calienta que se vuelve maleable.

Por otro lado; un autobús necesita de una mezcla con una gran capacidad portante, debido al peso del vehículo, pero con una fórmula cuyo tamaño máximo de árido es 11,2mm, no se puede cumplir ese parámetro, habría que introducir áridos de mayor tamaño.

La mezcla ideal sería, eliminar la base de arena-betún (las imperfecciones existentes se taparían con la misma mezcla que se extenderá en la rodadura o empleando geotextiles) y una rodadura tipo AC22 SURF S, en la que el tamaño máximo de árido es 20mm (árido ofítico), un betún duro (tipo 15/25) modificado con polímeros caucho (parte polvo de neumático y parte caucho natural).

Por tanto, esta mezcla podría funcionar para resolver la problemática de los autobuses de forma definitiva, aunque para el caso de los caballos no lo sería, pero sí que alargaría el estado óptimo de la vía frente a las mezclas que actualmente se emplean.





## 8 NUEVAS LÍNEAS DE TRABAJO

*“Se tendrían que enseñar principios de estrategia que permitan afrontar riesgos, lo inesperado, lo incierto y modificar su desarrollo en virtud de las informaciones adquiridas. Es necesario aprender a navegar en un océano de incertidumbres a través de archipiélagos de certeza.”*

*-Morin, E., 2000 -*

Se propone como nuevas líneas de trabajo para el avance de los hormigones bituminosos las siguientes ideas:

- Tramo de ensayo con la mezcla propuesta en las conclusiones en el viario urbano de la ciudad de Sevilla, en concreto, en una de las zonas que haya que reparar por las deformaciones causadas por los autobuses y caballos para poder analizar el comportamiento de la mezcla asfáltica durante diferentes periodos de tiempo.
- Concienciar a los cocheros de Sevilla que los equinos no sufren por cambiar de tipología de herradura y comenzar a emplear herraduras con base de goma.
- Conocer mejor la fabricación, extendido y comportamiento de las mezclas asfálticas templadas con alto porcentaje de árido procedente de fresado por parte de los especialistas en la materia para comenzar a introducirlas en el mercado.
- Fomentar el empleo de geotextiles impregnados para evitar la aparición de grietas en la capa de rodadura. Dicho geotextil irá interpuesto entre el soporte fisurado y las capas superiores, el cual es capaz de absorber los esfuerzos originados al paso de los vehículos, al mismo tiempo que sirven de membrana impermeable, evitando la penetración de humedad.

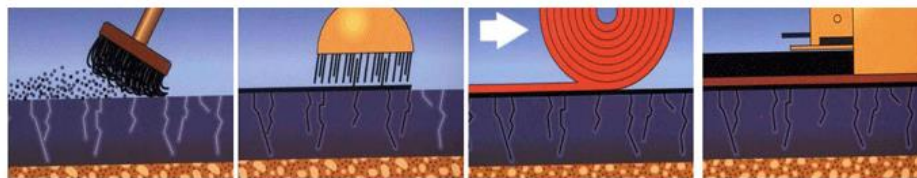


Figura 8-1. Empleo de geotextil entre capas asfálticas.

- España es el primer país productor de aceitunas, generando una media de 37.000 tn de residuos en forma de huesos de aceituna al año, por lo que sería interesante realizar ensayos sustituyendo total o parcialmente los áridos por huesos de aceitunas en la fórmula de trabajo de una mezcla asfáltica y sacar conclusiones de los resultados obtenidos.



## **ANEXO DATOS DE TRABAJO**

---

## ADHESIVIDAD DE LOS LIGANTES BITUMINOSOS EN PRESENCIA DE AGUA (NLT-166/92)

REFERENCIA: 061/17

FECHA ENTRADA: 08/08/2017

PROCEDENCIA DEL MATERIAL: Cantera "Sierra de los Caballos"

DESCRIPCIÓN MATERIAL: árido 4/12

LOCALIZACIÓN: Sierra de Yeguas (MÁLAGA) "PREASUR-MAYGAR"

TIPO DE MUESTRA: Recogida en cantera, 1 saco de 20kg. Según UNE EN 932-1:1997

FECHA INICIO ANÁLISIS: 12/08/2017

FECHA FIN ANÁLISIS: 19/08/2017

TIPO BETÓN: Betún 35/50 Cepsasfalt

RESULTADOS OBTENIDOS:

El porcentaje de la superficie del árido cubierta por el ligante es superior al 95%.



OBSERVACIONES:

FECHA: 19/08/2017

FIRMA :

**M.B.C. CONTENIDO EN LIGANTE SOLUBLE UNE-EN 12697-1 Extración con ligante B.1.6 Separación del material mineral B.2.4 Determinación del ligante por diferencia**

IE-MB-GR-003  
R02



REFERENCIA: 0106/18

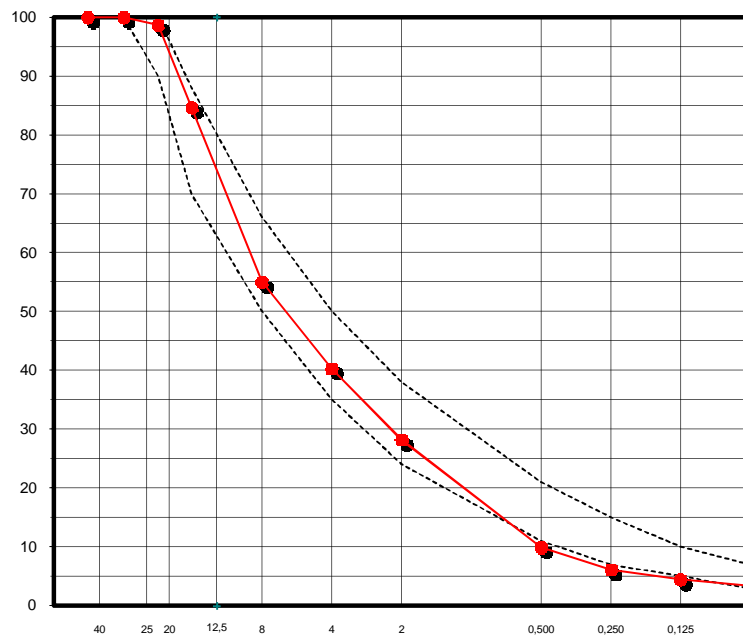
OBRA:

**DATOS DE TOMA DE MUESTRA**

Planta de aglomerado:	CARMONA	Lugar de toma:	EN PLANTA
Fecha de toma:	17/04/2018	Tipo de mezcla:	AC22 SURF 50/70 S OFITA
Hora de toma	8:50	Temperatura	173
Camión:	0089FZF		
Localización:	CARMONA		

**RESULTADOS DEL ENSAYO:**

GRANULOMETRIA		
TAMIZ UNE	% QUE PASA	HUSO S-20
45	100,0	
31,5	100,0	100
22,4	98,6	90/100
16	84,7	70/88
8	55,0	50/66
4	40,3	35/50
2	28,2	24/38
0,5	9,9	11/21
0,25	6,1	7/15
0,125	4,5	5/10
0,063	3,4	3/7



CONTENIDO EN LIGANTE SOBRE ÁRIDO (%)	4,32
CONTENIDO EN LIGANTE SOBRE MÉZCLA (%)	4,14
RELACIÓN FILLER BETÚN	0,8

Fecha: 27/04/18

Firma:

OBSERVACIONES: S20 OF ROD 22 FINA

**M.B.C. CONTENIDO EN LIGANTE SOLUBLE UNE-EN 12697-1 Extración con ligante B.1.6 Separación del material mineral B.2.4 Determinación del ligante por diferencia**

IE-MB-GR-003  
R02



REFERENCIA: 120/18

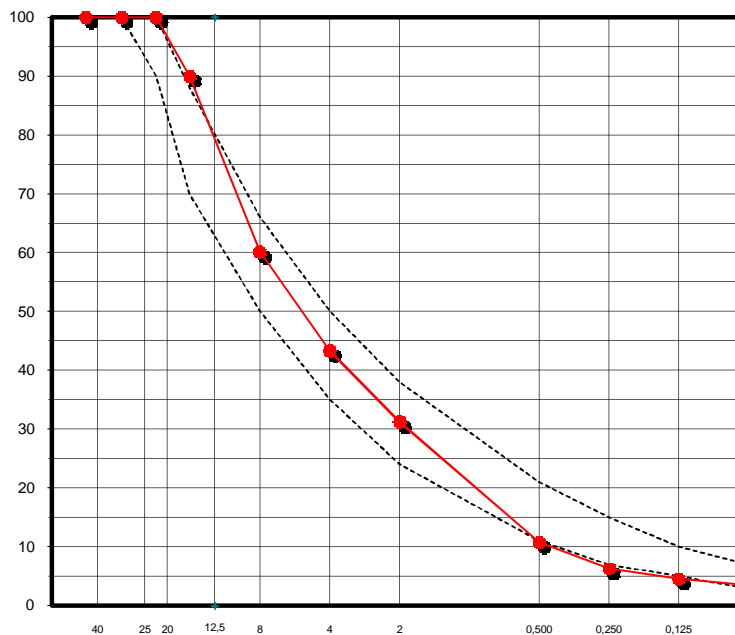
OBRA:

**DATOS DE TOMA DE MUESTRA**

Planta de aglomerado:	CARMONA	Lugar de toma:	EN PLANTA
Fecha de toma:	19/04/2018	Tipo de mezcla:	AC22 SURF 50/70 S OFITA120
Hora de toma	09:10	Temperatura	170
Camión:	0780ATE		
Localización:	CARMONA		

**RESULTADOS DEL ENSAYO:**

GRANULOMETRIA		
TAMIZ UNE	% QUE PASA	HUSO S-20
45	100,0	
31,5	100,0	100
22,4	100,0	90/100
16	90,0	70/88
8	60,1	50/66
4	43,3	35/50
2	31,2	24/38
0,5	10,8	11/21
0,25	6,3	7/15
0,125	4,6	5/10
0,063	3,5	3/7



CONTENIDO EN LIGANTE SOBRE ÁRIDO (%)	4,54
CONTENIDO EN LIGANTE SOBRE MÉZCLA (%)	4,35
RELACIÓN FILLER BETÚN	0,8

Fecha: 24/04/18

Firma:

OBSERVACIONES: S20 OF ROD 22 FINA 4,2% b/M CON RECICLADO



# REFERENCIAS

- 12594, E. (s.f.). *Bitumen and bituminous binders - Preparation of test samples*.
- 12697-11, E. (s.f.). *DETERMINATION OF THE AFFINITY BETWEEN AGREGATE AND BITUMEN*.
- 12697-35, E. (2004). *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Laboratory mixing*.
- 13043, E. (2013). *Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas*.
- 13924, E. (s.f.). *Bitumen and bituminous binders - Specifications for hard paving grade bitumen*.
- A., R.-B. (2011). *Equipos de ensayos para la ingeniería civil. Mecánica Científica s.a. Edición Especial*.
- AENOR. (s.f.). *Asociación Española de Normalización y Certificación*.
- 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*, 5, págs. 7-45.
- ASEFMA (Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas). (s.f.). Obtenido de <http://www.asefma.es/publicaciones/>
- Asphalt Handbook 7ª Edition*. (s.f.). Asphalt Institute (MS-4).
- B-06714/22, P. (-8). (s.f.). *DETERMINATION OF BITUMEN ADHESION*.
- Bagampadde, U. U. (2005). Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures. *Int j pavement eng* 6(4), (págs. pp. 229-239).
- Bañón Blázquez, L. y. (2000). *Manual de Carreteras*. Enrique Ortiz e Hijos Contratista de Obras.
- Bhasin, A. (2006). Development of Methods to Quantify Bitumen-Aggregate Adhesion and Loss of Adhesion Due to Water. Ph.D. Dissertation. TexasA: Texas A&M University, College Station.
- Blanco Ferrero, S. (s.f.). MATERIALES DE CONSTRUCCION. (Universidad de Oviedo). En *TEMA 3.- MATERIALES PÉTREOS NATURALES*.
- Błażejowski K., S. S. (2004). *Technologia warstw bitumicznych. WKŁ, Warszawa*.
- Blázquez, L. B. (2000). "*Construcción y mantenimiento de Carreteras*" *Manual de carreteras tomo 2*.
- CARRETEROS. (s.f.). Obtenido de <http://www.carreteros.org/>
- CEDEX. (s.f.). *Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas*. Obtenido de [http://www.cedex.es/CEDEX/lang\\_castellano/](http://www.cedex.es/CEDEX/lang_castellano/)
- CEPSA *BETUNES*. (s.f.). Obtenido de <https://www.cepsa.es/es/utilidades/catalogo/asfaltos/carretera/betunes%E2%80%93asfálticos>
- Contreras, V. (Mayo, 2014). Actualización de la normativa nacional y europea para emulsiones Bituminosas. *Congreso de la Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas*. ATEB.
- CW, C. (s.f.). *Investigation of asphalt-aggregate interaction in asphalt*. Chemical Engineering Department. Auburn University.
- D., H. A. (December, 2005). Adhesion in bitumen-aggregate systems and quantification of the effects of water on the adhesive bond. . The Texas A&M University System.



- D., V. L. (March, 2008). Aggregate characterization in relation to bitumen-aggregate adhesion. . Finalreport. D3625-96, A. (2005). *Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate using Boiling Water*.
- D4867, A. (2014). *Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures*.
- Daučík P., H. M. (June 13, 2011.). *Methods for determination of affinity between aggregate and bitumen. 45th International Petroleum Conference*. Bratislava, Slovak Republic.
- Diederik van Lent. (March 2008). *Aggregate characterisation in relation to bitumen-aggregate adhesion*. Delft University of Technology.
- DR., J. (s.f.). Chemical and Mechanical Processes of Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt Pavements. . *Dallas N. Little Texas A&M University*.
- E., T. ( 2011). Adhezja asfaltu do kruszywa, Instytut Nafty i Gazu. Kraków.
- EUROBITUMEN. (s.f.). Obtenido de <http://www.eurobitume.eu/>
- EUROBITUMEN. (s.f.). <http://www.eurobitume.eu/>.
- EUROPEAN AGGREGATE ASSOCIATION. (s.f.). Obtenido de <http://www.uepg.eu/>
- EUROSLAG. (s.f.). Obtenido de <http://www.euroslag.com/applications/aggregates/>
- FOMENTO, M. D. (s.f.). *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG3). Parte 5 - Firmes y Pavimentos*.
- García Travé, G. M. (2012). *Análisis comparativo del comportamiento mecánico de mezclas bituminosas. normativa NLT-normativa UNE-EN*. Granada.
- Gary R., S. L. (February 4-6. 2003.). Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements. A national seminar. San Diego, California.
- Gawel I., K. M. (2001). *Asfalty drogowe*. Warszawa .
- Gorkem, C. y. (2009). Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime. *Constr Build Mater* 23(6)., (págs. pp. 2227-2236.).
- Hernández JL., S. V. (2001). Efectos por la construcción y conservación de superficies de rodamiento. . *Sanfandila. Publicación Técnica N° 163*. .
- Huérfano, C. A. (Mayo, 2012). *Determinación del fenómeno stripping en mezclas asfálticas porosas preparadas con asfalto base de similar penetración y proveniente de Colombia y Venezuela*. Universidad Piloto de Colombia.
- Hugener M., B. F. (13-15th June 2012.). Affinity between bitumen and aggregates. Improvement of the en static test method. *5th Euraspphalt & Eurobitume Congress*. Istanbul.
- INTERCONTROL. (2010). *Materiales bituminosos. Mercado CE*.
- K., G. (2003). *Mineral waste raw materials and their importance in the domestic management of mineral raw materials, Gosp. Sur. Min.,*
- Kiggundu, B. y. (s.f.). Stripping in HMA mixtures: state-of-the-art and critical review of test methods. National Center for Asphalt Technology. Alabama: NCAT report No. 88-2, Auburn University.
- Kraemer, C. (2004). *Ingeniería de Carreteras*. Mc Graw Hill.
- Little, D. y. (s.f.). Chemical and mechanical processes of moisture damage in hot-mix asphalt pavements. En: *Proceedings of the Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements. A National Seminar, California*.
- M., I. (2012). Adsorpcja asfaltu przez kruszywo w mieszance mineralno-asfaltowej. *Drogownictwo, wrzesień* .
- Miro, R., Jiménez, F. P., & Olivier., M. (s.f.). *Evaluación de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas formuladas a partir de la normativa española y francesa*. Universidad Politécnica de Cataluña. Tesis Doctoral.

- Montero, M. (2010). "Dosificación de mezclas bituminosas" Jornada Técnica de Mezclas Bituminosas; dosificación, fabricación, puesta en obra y control de calidad. Barcelona.
- MOPU. (Noviembre, 1987). *Mezclas Bituminosas porosas. Tecnología de carreteras. Tomo 18*.
- Moraes, R. V. (13th to 15th June 2012). Understanding Adhesion and Cohesion of Asphalt-Aggregate Systems Using the Bitumen Bond Test and the Sessile Drop Method. . *Abstract accepted for 5th Eurasphalt and Eurobitumen Congress*. Istanbul, Turkey, .
- Namutebi, B. M. ( 1-January-2011). "Foaming Effects on Binder Chemistry and Aggregate Coatability using Foamed Bitumen." Road Materials and Pavement Design.
- NLT-162/00, N. (2000). *Efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas bituminosas compactadas (ensayo de inmersión-compresión)*.
- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes (PG3)*, . (Julio, 2002).
- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de Carreteras y Puentes (PG3), Materiales básicos*. (Diciembre, 2014).
- Ramos, R. T. (2015). *Influencia de los agentes externos sobre el comportamiento viscoelastoplástico de mezclas bituminosas para firmes de carreteras*. Universidad de Salamanca. Grupo de investigación en fractura e integridad estructural.
- REPSOL PRODUCTOS*. (s.f.). Obtenido de <https://www.repsol.com/es/productos-y-servicios/asfaltos/betunes/index.cshtml>
- S., B. (1990). *The Shell Bitumen Handbook. Shell Bitumen*. . Wielka Brytania.
- Sengoz, B. y. (2007.). Effect of asphalt film thickness on the moisture sensitivity characteristics of hot-mix asphalt. *Build environ* 42., (págs. pp. 3621-3628.).
- Sunghwan, K. y. (s.f.). Evaluation of hot mix asphalt moisture sensitivity using the Nottingham Asphalt Test Equipment. Center for transportation, research and education, Iowa State University.
- T283, A. (2007). *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt mMixtures to moisture-induced damage*.
- Viswanathan, A. (2005). Investigation of Moisture Sensitivity of Hot Mix Asphalt Concrete. Tesis doctoral. University of West Virginia.