



ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERS DE
CAMINS, CANALS I PORTS

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



Estudio de la viabilidad del uso de mezclas SMA en capa intermedia para el refuerzo de firmes. Aplicación práctica en un tramo de la autovía A-7 situado entre el P.K. 468+700 al 468+300 (T.M. de Sagunto)

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Autor: Nora Esteban Sanzol

Tutor: Alfredo García García

Cotutor: Griselda López Maldonado

Valencia, Julio 2017

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. RESUMEN	1
CAPÍTULO 2. OBJETO Y ESTRUCTURA	2
CAPÍTULO 3. INTRODUCCIÓN	4
CAPÍTULO 4. ESTADO DEL ARTE.....	7
4.1. LAS CAPAS DEL FIRME.....	7
4.1.1. Explanada.....	10
4.1.2. Capa sub-base.....	10
4.1.3. Capa de base	11
4.1.4. Capa intermedia	11
4.1.5. Capa de rodadura.....	12
4.1.6. Capas especiales.....	13
4.2. AGENTES SOLICITANTES DE LOS FIRMES.....	15
4.3. TIPOS DE DETERIOROS.....	17
4.3.1. Deformaciones	18
4.3.2. Fisuración	19
4.4. ESTUDIOS REALIZADOS.....	23
4.4.1. Investigaciones internacionales	24
4.4.2. Investigaciones desarrolladas en España.....	28
4.5. DIFERENCIAS ENTRE LA MEZCLA DE ESTUDIO SMA CON MEZCLA CONVENCIONAL AC	34
CAPÍTULO 5. TRABAJO EXPERIMENTAL	37
5.1. INTRODUCCIÓN	37
5.1.1. Criterios de diseño para la mezcla patrón AC22 según PG-3	38
5.1.2 Hipótesis de diseño para mezcla tipo SMA.	40
5.2. PLAN DE TRABAJO	41
5.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	45
5.3.1. Áridos	45
5.3.2. Polvo mineral-filler.....	47
5.3.3. Ligante.....	48
5.3.4. Fibras	49
5.4. DETERMINACIÓN ÓPTIMO BETÚN PARA MEZCLA SMA	50
5.4.1. Dosificaciones de estudio	52
5.4.2. Análisis volumétrico.....	54

5.4.3. Deformación permanente y sensibilidad al agua	54
5.4.4. Conclusiones.....	56
5.5. CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS DE ESTUDIO	57
5.6. MÉTODOS DE ENSAYO	60
5.6.1. Resistencia a la fatiga. Ensayo de flexión en 4 puntos sobre probetas prismáticas.....	60
5.6.2. Propagación de fisuras. Ensayo de flexión con una probeta semicircular o ensayo SCB (Semi-Circular Bending).....	63
5.6.3. Ensayo de Rigidez.....	68
CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	72
6.1. INTRODUCCIÓN	72
6.2. ENSAYO DE FLEXIÓN EN 4 PUNTOS SOBRE PROBETAS PRISMÁTICAS	72
6.2.1. Introducción	72
6.2.2. Leyes de fatiga.....	73
6.3. ENSAYO DE FLEXIÓN CON UNA PROBETA SEMICIRCULAR O ENSAYO SCB.....	75
6.3.1. Introducción	75
6.3.2. Gráficos Fuerza – Desplazamiento	76
6.3.3. Resistencia a rotura y energía disipada.....	77
6.4. ENSAYO DE RIGIDEZ.....	78
6.4.1. Introducción	78
6.4.2. Módulos	79
CAPÍTULO 7. APLICACIÓN PRÁCTICA.....	81
7.1. INTRODUCCIÓN	81
7.2. ESTADO ACTUAL	82
7.2.1. Localización.....	82
7.2.2. Geometría.....	83
7.2.3. Tráfico	83
7.2.4. Climatología	84
7.2.5. Firme existente.....	84
7.3. FORMULA DE TRABAJO.....	85
7.4. ACTUACIÓN Y SECCIONES.....	87
7.5. RESULTADOS	88
7.6. VALORACIÓN ECONÓMICA.....	90
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y POSIBLES LINEAS DE INVESTIGACIÓN	97
CAPÍTULO 9. CONCLUSIÓN	100

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXO 1. ENSAYOS EN LABORATORIO.....	104
ANEXO 2. ENSAYO DE FATIGA.....	127
ANEXO 3. ENSAYO SCB.....	135
ANEXO 4. ENSAYO DE RIGIDEZ	151

INDICE FIGURAS

Figura 1. Esqueleto mineral de una SMA y una HMA.....	5
Figura 2. Capas que componen el firme flexible y firme rígido. Fuente: Manual de Carreteras [9].....	10
Figura 3. Tensiones generadas por variaciones térmicas. Fuente: Elaboración propia.....	15
Figura 4. Carga generada por el tráfico. Fuente: Secciones de firme de la Comunidad Valenciana [4].....	16
Figura 5. Deterioros estructurales. Deformaciones.....	18
Figura 6. Fisuración longitudinal.....	20
Figura 7. Fisuración transversal.....	20
Figura 8. Fisuras en bloque.....	21
Figura 9. Fisuras por fatiga de la mezcla.....	22
Figura 10. Fisuración de borde.....	22
Figura 11. Fisuración por reflexión de juntas.....	23
Figura 12. Curva granulométrica para una AC 22 y una SMA 16.....	34
Figura 13. Esqueleto mineral en mezcla AC y SMA.....	35
Figura 14. Vida útil de las autovías según el estudio [24].....	36
Figura 15. Esquema de trabajo. Fuente: Elaboración propia.....	44
Figura 16. Ubicación cantera CAPLANSA y planta PAVASAL. Vista aérea.....	45
Figura 17. Ligante hidrocarbonado a emplear para capa de rodadura y siguiente. Fuente: Tabla 542.1.a del PG-3.....	48
Figura 18. Propiedades contrapuestas en la determinación del óptimo de betún. Fuente: Elaboración propia.....	51
Figura 19. Curva granulométrica para una SMA 16 con 6,1% de Betún modificado.....	53
Figura 20. Curva granulométrica. Husos SMA 16.....	59
Figura 21. Probetas serradas y equipo de ensayo a fatiga.....	62
Figura 22. Montaje del ensayo, entalla generada y almacenamiento.....	64
Figura 23. Curva carga-desplazamiento.....	65
Figura 24. Ejemplo ensayo SCB para muestra SMA 16.....	67
Figura 25. Equipo de ensayo para ensayo obtener el módulo de rigidez.....	69
Figura 26. Equipo de ensayo y probetas para obtención de Módulos de rigidez.....	70
Figura 27. Grafica comparativa de las leyes de fatiga AC 22 y SMA 16.....	74
Figura 28. Ensayo SCB.....	75

Figura 29. Gráfica comparativa fuerza-desplazamiento para las mezclas de estudio	77
Figura 30. Comparativa del módulo de rigidez para una AC 22 y una SMA 16	80
Figura 31. Situación tramo experimental	82
Figura 32. Sección transversal calzada	83
Figura 33. Mapa climatología según PG3	84
Figura 34. Secciones reposición firme A-7 desde P.K 468+700 a P.K. 468+300	88
Figura 35. Tamizado de los áridos.....	105
Figura 36. Ensayo del equivalente de arena.....	108
Figura 37. Material preparado para la realización de ensayos	110
Figura 38. Preparación probetas Marshall	111
Figura 39. Preparación de probetas mediante compactador de placa.....	112
Figura 40. Preparación de probetas de 150 mm mediante compactador giratorio	114
Figura 41. Material para obtener la densidad máxima	114
Figura 42. Recipiente con mezcla para realizar el ensayo de recuperación de betún	115
Figura 43. Determinación de la densidad aparente	116
Figura 44. Densidad aparente según método geométrico. Probetas Marshall	117
Figura 45. Densidad aparente según método geométrico. Probetas de pista	118
Figura 46. Realización del ensayo de densidad máxima	119
Figura 47. Equipo de recuperación de betún por centrifuga	121
Figura 48. Equipo de ensayo Marshall	123
Figura 49. Ensayo de sensibilidad al agua	126
Figura 50. Ley de fatiga AC 22	128
Figura 51. Ley de fatiga SMA 16 5,1% BM	130
Figura 52. Ley de fatiga SMA 16 5,6% BM	132
Figura 53. Ley de fatiga SMA 16 6,1% BM	134
Figura 54. Gráficas fuerza-desplazamiento AC 22	137
Figura 55. Gráficas fuerza-desplazamiento SMA 16 5,1% BM	141
Figura 56. Gráfica fuerza-desplazamiento SMA 16 5,6% BM.....	145
Figura 57. Gráficas fuerza-desplazamiento SMA 16 6,1% BM	149
Figura 58. Gráfica impulsos de carga AC 22	156
Figura 59. Gráficas impulsos de carga SMA 16 5,1% BM	161
Figura 60. Gráficas impulsos de carga SMA 16 5,6% BM	166
Figura 61. Gráficas impulsos de carga SMA 16 6,1% BM	168

INDICE TABLAS

Tabla 1. Propiedades técnicas de las mezclas bituminosas. Fuente: Metodología ALEAS [3].....	9
Tabla 2. Propiedades técnicas relevantes según posición de la mezcla. Fuente: Metodología ALEAS [3]	14
Tabla 3. Tipos de deterioros en firmes flexibles. Fuente: Elaboración propia a partir de [9], [10] y [11].....	17
Tabla 4. Registro obras realizadas por JRS con SMA como capa intermedia.....	26
Tabla 5. Características empíricas y fundamentales de la mezcla SMA 16.....	29
Tabla 6. Husos granulométricos para SMA 16 (% en masa). Fuente: Normativa europea y Propuesta de Pliego	31
Tabla 7. Tipo de mezcla, espesor y contenido de ligante. Fuente: Propuesta de Pliego ...	31
Tabla 8. Valores mínimos de sensibilidad al agua. Fuente: Propuesta de Pliego.....	32
Tabla 9. Pendiente media de deformación en pista (mm para 10 ³ ciclos de carga). Fuente: Propuesta de Pliego	33
Tabla 10. Contenido de huecos en mezcla en probetas. Fuente: Tabla 542.12 del PG-3.	39
Tabla 11. Pendiente media de deformación en pista (WTSaire) y profundidad media (expresada en %) de la rodera (PRDaire) en el intervalo de 5.000 a 10.000 ciclos para capa de rodadura e intermedia. Fuente: Tabla 542.13.a del PG-3.....	39
Tabla 12. Hipótesis de diseño para mezclas tipo SMA.....	41
Tabla 13. Análisis granulométrico áridos de la planta de Chilches. Fuente: Elaboración propia.....	46
Tabla 14. Características de los áridos suministrados por CAPLANSA. Fuente: Elaboración propia.....	47
Tabla 15. Densidad aparente del filler utilizado en la planta de Chilches. Fuente: Elaboración propia.....	47
Tabla 16. Características del betún utilizado en la planta de Chilches. Fuente: Elaboración propia.....	49
Tabla 17. Características de las fibras suministradas por JRS. Fuente: Elaboración propia a partir del informe suministrado por el proveedor.....	50
Tabla 18. Dosificaciones de estudio para comprobar el óptimo de betún. Fuente: Elaboración propia.....	53
Tabla 19. Análisis volumétrico para comprobar el óptimo de betún.....	54

Tabla 20. Deformación permanente para comprobar el óptimo de betún	55
Tabla 21. Sensibilidad al agua para comprobar el óptimo de betún	56
Tabla 22. Resumen características mínimas mezclas de estudio	56
Tabla 23. Dosificación de las mezclas AC 22 y SMA 16 de estudio	58
Tabla 24. Características mezcla AC 22 y SMA 16 de estudio.....	58
Tabla 25. Ensayos realizados durante el estudio	60
Tabla 26. Ley de fatiga y microdeformación para un millón de ciclos de la AC 22 y SMA 16	73
Tabla 27. Resultados ensayo SCB para mezcla AC 22 y SMA 16	76
Tabla 28. Resistencia a la fisuración y energía disipada en mezcla AC 22 y SMA 16	78
Tabla 29. Módulo de rigidez para mezcla AC 22 y SMA 16.....	79
Tabla 30. Factores de diseño según posición de la mezcla y tipo de tráfico. Fuente: Metodología ALEAS [3]	85
Tabla 31. Comparativa resultados AC 22 y SMA 16 de estudio	86
Tabla 32. Fórmula de trabajo para la aplicación de la SMA 16.....	87
Tabla 33. Resultados obtenidos de los testigos extraídos en la zona de estudio	89
Tabla 34. Mediciones. Aplicación práctica	90
Tabla 35. Presupuesto. Aplicación práctica	94
Tabla 36. Ensayo fatiga. Datos probetas AC 22	127
Tabla 37. Ensayo fatiga. Resultados ensayo AC 22	128
Tabla 38. Ensayo fatiga. Datos probetas SMA 16 5,1% BM.....	129
Tabla 39. Ensayo fatiga. Resultados ensayo SMA 16 5,1% BM.....	129
Tabla 40. Ensayo fatiga. Datos probetas SMA 16 5,6% BM.....	131
Tabla 41. Ensayo fatiga. Resultados ensayo SMA 16 5,6% BM.....	131
Tabla 42. Ensayo fatiga. Datos probetas SMA 16 6,1% BM.....	133
Tabla 43. Ensayo fatiga. Resultados obtenidos SMA 16 6,1% BM.....	133
Tabla 44. Ensayo SCB. Datos probetas AC 22	135
Tabla 45. Ensayo SCB. Resultados ensayo AC 22	135
Tabla 46. Ensayo SCB. Cálculos realizados AC 22 (1)	138
Tabla 47. Ensayo SCB. Cálculos realizados AC 22 (2)	138
Tabla 48. Ensayo SCB. Datos probetas SMA 16 5,1% BM	139
Tabla 49. Ensayo SCB. Resultados ensayo SMA 16 5,1% BM	139
Tabla 50. Ensayo SCB. Cálculos realizados SMA 16 5,1% BM (1)	142

Tabla 51. Ensayo SCB. Cálculos realizados SMA 16 5,1% BM (2)	142
Tabla 52. Ensayo SCB. Datos probetas SMA 16 5,6% BM	143
Tabla 53. Ensayo SCB. Resultados ensayo SMA 16 5,6% BM	143
Tabla 54. Ensayo SCB. Cálculos realizados SMA 16 5,6% BM	146
Tabla 55. Ensayo SCB. Cálculos realizados SMA 16 5,6% BM	146
Tabla 56. Ensayo SCB. Datos probetas SMA 16 6,1% BM	147
Tabla 57. Ensayo SCB. Resultados ensayo SMA 16 6,1% BM	147
Tabla 58. Ensayo SCB. Cálculos realizados SMA 16 6,1% BM (1)	150
Tabla 59. Ensayo SCB. Cálculos realizados SMA 16 6,1% BM (2)	150
Tabla 60. Ensayo de rigidez. Datos probetas AC 22	151
Tabla 61. Ensayo de rigidez. Resultados ensayo AC 22	151
Tabla 62. Ensayo de rigidez. Datos probetas SMA 16 5,1% BM	157
Tabla 63. Ensayo de rigidez. Resultados ensayo SMA 16 5,1% BM	157
Tabla 64. Ensayo de rigidez. Datos probetas SMA 16 5,6% BM	162
Tabla 65. Ensayo de rigidez. Resultados ensayo SMA 16 5,6% BM	162
Tabla 66. Ensayo de rigidez. Datos probetas SMA 6,1% BM	167
Tabla 67. Ensayo de rigidez. Resultados ensayo SMA 16 6,1% BM	167

CAPÍTULO 1. RESUMEN

En el presente documento se muestra el trabajo experimental desarrollado en torno a las mezclas bituminosas tipo SMA 16 (Stone Mastic Asphalt), una mezcla bituminosa poco común en España. Estas mezclas se caracterizan por poseer una gran cantidad de árido grueso, una elevada proporción de ligante y de polvo mineral, y una baja cantidad de árido de tamaño intermedio (entre 2 y 4 mm), surgiendo así un buen esqueleto mineral y una alta proporción de mastic rico en filler. Estas características confieren a la mezcla como una posible solución a la problemática existente de fallo por fatiga de la mezcla y aparición de fisuras en el firme, mediante su uso como capa intermedia.

Con el fin de conocer la respuesta mecánica de las mezclas SMA, se han realizado ensayos experimentales en el laboratorio de la empresa constructora PAVASAL. Se ha evaluado la mezcla para dos tipos de betún, uno convencional 35/50 y otro modificado con polímeros elastoméricos PMB 45/80-65; y para distintos porcentajes de ligante: 5,1%, 5,6% y 6,1% de betún en mezcla.

Durante todo el estudio se comparan las características de la novedosa SMA 16 con la más comúnmente empleada AC 22, mostrando propiedades como: contenido de huecos, resistencia a la deformación permanente, resistencia al agua, resistencia a la fatiga de la mezcla, módulos de rigidez y resistencia a la fisuración. Propiedades requeridas para su uso como capa intermedia en el firme.

Entre las conclusiones destaca que, las mezclas SMA deben ser tratadas con betunes modificados con polímeros que mejoren su respuesta a las altas exigencias, proporcionando una mayor cohesión y tenacidad a la mezcla y por tanto una mayor resistencia a la fatiga y a las deformaciones plásticas. Además, se comprobó la mejor respuesta de la mezcla SMA 16 45/80-65 ante la resistencia a la fatiga de la mezcla y la propagación de las fisuras.

CAPÍTULO 2. OBJETO Y ESTRUCTURA

El objeto del presente Trabajo Final de Máster es investigar la viabilidad del uso de mezclas bituminosas en caliente tipo SMA (Stone Mastic Asphalt) para su empleo como capa intermedia en el firme. Se busca conocer su respuesta mecánica ante las sollicitaciones presentes en el firme. Para ello, se realizan diversos ensayos en el Laboratorio cedido por la EMPRESA CONSTRUCTORA PAVASAL S.A. que permiten obtener dichos resultados de manera experimental.

El estudio parte de un análisis bibliográfico de las investigaciones científicas realizadas sobre las mezclas en caliente tipo SMA, así como su empleo en capas intermedias; recogiendo datos tanto nacionales como internacionales. Esta primera fase permite identificar las propiedades y los ensayos requeridos para caracterizar estas mezclas tan poco usuales en España. Además, se muestran las especificaciones que rige la normativa europea emitida en 2006 respecto a los materiales de mezclas bituminosas tipo SMA (UNE – EN 13108-5).

En la segunda fase del estudio se describe la campaña experimental ejecutada, definiendo los ensayos realizados y los resultados obtenidos. Se busca analizar la respuesta de la mezcla de estudio mostrando propiedades mecánicas tales como: contenido de huecos, sensibilidad al agua, deformación permanente, capacidad portante, resistencia a fatiga y propagación de fisuras. Para ello, se investiga la posibilidad de emplear dos tipos de betún, uno convencional 35/50 y otro modificado con polímeros PMB 45/80-65. Durante todo el estudio se comparan los resultados de la novedosa SMA16 (Stone Mastic Asphalt) con la más comúnmente empleada AC22 (Asphalt Concrete).

En la tercera fase del estudio se realiza un análisis comparativo de las propiedades resultantes en los distintos ensayos y la priorización de cada uno de ellos en función de la

aplicación de la mezcla. En este caso, la cuarta fase consiste en la optimización de la mezcla de estudio para su aplicación en un tramo de la autovía A-7, en el término municipal de Sagunto, desde el P.K.468+700 al P.K. 468+300, teniendo en cuenta las solicitudes presentes y las características del firme existente. La obtención del comportamiento a largo plazo de la mezcla asfáltica se sale del alcance de este trabajo.

Por último, se exponen las principales conclusiones obtenidas del estudio, manifestando las dificultades encontradas y las posibles líneas de investigación.

CAPÍTULO 3. INTRODUCCIÓN

La internacionalización de los mercados ha provocado un aumento del transporte de mercancías por carretera y, por tanto, de las solicitaciones producidas en las carreteras. Esto equivale a una reducción de las propiedades estructurales y funcionales del firme como consecuencia de la degradación de las propiedades mecánicas. Uno de los deterioros más frecuentes en las capas bituminosas es el fallo por fatiga, lo que produce microfisuras en el material. Estas fisuras además de ir progresando en el tiempo, permiten la infiltración de agua, debilitando aún más la estructura, siendo necesario realizar importantes operaciones de conservación del firme. Así pues, al margen de las operaciones de conservación que toda vía requiere para su perfecto funcionamiento, lo deseable sería encontrar un tipo de mezcla asfáltica que reduzca la aparición de fisuras o que, al menos, prolongase el tiempo de aparición. Este es el principal motivo por el cual se inicia el estudio.

El diseño de firmes de carreteras ha empleado durante muchos años la capacidad portante como criterio primordial para el diseño de capas de base que sustenten estructuralmente las solicitaciones presentes en la carretera. Este criterio venía motivado por el riesgo y falta de operatividad que provocaba la aparición de roderas o exudaciones de betún en el firme. Pero, aunque erradicó muchos de estos problemas, acababan ofreciendo firmes excesivamente rígidos con baja resistencia a la fatiga, limitando, por tanto, la vida útil de la vía.

Las mezclas denominadas SMA (por sus siglas en inglés *Stone Mastic Asphalt*) son mezclas asfálticas caracterizadas por poseer una gran cantidad de árido grueso, una elevada proporción de ligante y de polvo mineral, una baja cantidad de árido de tamaño intermedio y una pequeña cantidad de aditivo estabilizante. De esta manera se genera un buen esqueleto mineral y una alta proporción de mástic rico en filler que permiten conseguir una alta capacidad portante sin inferir en la flexibilidad de la mezcla.

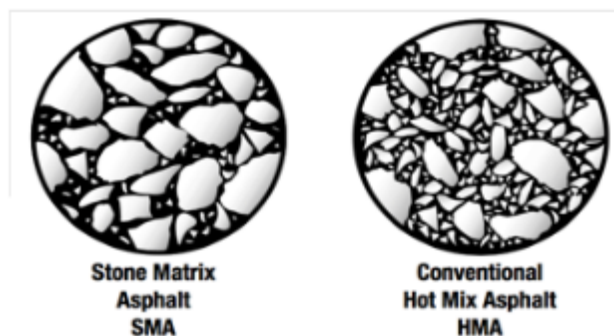


Figura 1. Esqueleto mineral de una SMA y una HMA

Teniendo en cuenta que la parte inferior del firme es la más expuesta a resistir los esfuerzos de flexión, su uso podría ser una alternativa interesante como capa intermedia del firme. Hasta el momento, su uso siempre ha estado enfocado hacia capas de rodadura, existiendo una falta de investigación y conocimiento acerca de su aplicación como capa intermedia.

En este proyecto se plantea, por tanto, el uso de mezclas SMA en capas intermedias del firme, tratando de comprobar que su uso produciría una reducción de los problemas asociados a fallos por fatiga del material y aparición de fisuras.

Las *Stone Mastic Asphalt*, SMA, tienen su origen en Alemania a mediados de los años 60, como respuesta a los problemas que producían los neumáticos de clavos en las capas de firme. El concepto de SMA se basa en un importante esqueleto mineral y alta proporción de ligante, que proporciona a la mezcla de alta resistencia cortante, baja deformación permanente y alta durabilidad.

Actualmente, aunque este tipo de mezclas han sido estudiadas y aplicadas a nivel mundial, no están incluidas en el pliego de prescripciones técnicas de la normativa española, PG-3. Por lo tanto, no son de aplicación directa en las obras controladas por el Ministerio. Así, el propósito de este proyecto también es establecer algunas bases técnicas, que sumadas a las existentes, ayuden a la realización de pruebas en obra y contribuya a que este tipo de mezclas lleguen a formar parte de la normativa nacional sobre firmes de carreteras. Si bien es cierto, en el año 2006 se redactó la primera normativa europea para organizar los métodos de realización de las mezclas SMA en los diferentes países, la *EN 13108-5 – “Especificaciones de materiales. Parte 5: Mezclas bituminosas tipo SMA”*, pero

haciendo referencia a su uso como capa de rodadura.

Las aplicaciones y estudios realizados en torno a este tipo de mezclas coinciden en las ventajas obtenidas. Entre ellas destacan:

- **Durabilidad.** Se trata de una mezcla prácticamente impermeable debido a su bajo contenido en huecos de aire. Esto provoca una mejora en la resistencia al envejecimiento y la sensibilidad a la humedad.
- **Buena estabilidad a altas temperaturas** como consecuencia de un importante esqueleto mineral, aumentando el rozamiento interno y por tanto, la resistencia al corte.
- **Buena flexibilidad a bajas temperaturas** como consecuencia de un mayor contenido de ligante en la mezcla.
- **Mezcla estable.** No se produce escurrimiento del betún a pesar de su alta proporción en la mezcla como consecuencia del aditivo estabilizante, fibras de celulosa.
- **Buena adherencia árido-ligante.** Esta característica se obtiene por medio del empleo de altos contenidos de filler y fibras.

Además de estas ventajas se reconocen otras asociadas a su uso como capa de rodadura, que son:

- **Reducción del impacto sonoro**
- **Alta resistencia al deslizamiento**
- **Reducción del fenómeno aqua planning**

El principal inconveniente que presenta este tipo de mezclas es el coste asociado a una mayor proporción de ligante, una mayor proporción de filler y la utilización de aditivos estabilizantes. Por ello, se debe garantizar que su uso reduzca las tareas de mantenimiento y aumente la vida útil de la obra.

CAPÍTULO 4. ESTADO DEL ARTE

El presente apartado pretende recoger los estudios realizados en torno a las mezclas Stone Mastic Asphalt (SMA), más concretamente respecto a su uso como capa intermedia en el firme. Con ello, se podrá tener una primera idea del comportamiento que resultará de la mezcla y los ensayos necesarios para su caracterización.

En España se han realizado varios estudios sobre su utilización como capa de rodadura, aunque su aplicación ha sido escasa ya que se ha apostado por las mezclas BBTM, pero no existen grandes investigaciones acerca de su utilización como capa intermedia.

Se presentará a su vez, una breve explicación de la funcionalidad de las mezclas bituminosas en las capas que componen el firme y las solicitudes a las que están expuestas. De esta manera, podremos verificar si las características que presenta una mezcla de tipo SMA cumple con las exigencias requeridas en la capa intermedia del firme y si ésta, podría mejorar la vida de servicio de la vía.

Para poder comprobar si la mezcla mejoraría la vida de servicio, es necesario conocer las causas más frecuentes que producen deterioros en el firme. Por tanto, en este apartado se describen los diversos tipos de deterioros presentes en las vías, realizando especial mención a la fisuración.

4.1. LAS CAPAS DEL FIRME

Se denomina como firme a la estructura multicapa constituida por un conjunto estratificado de capas sensiblemente horizontales formadas por diversos materiales sueltos o tratados con una sustancia aglomerante, cuya misión es transmitir adecuadamente las

cargas generadas por el tráfico, sin que se produzcan deformaciones inadmisibles o deterioros que reduzcan la funcionalidad del mismo durante la vida útil de la vía. En función de los materiales y las capas que componen el firme, además de su forma de resistir los esfuerzos, la normativa 6.1. I.C. (Secciones de firme de la Instrucción de Carreteras) clasifica los firmes en: **firmes flexibles**, formados por capas granulares no tratadas y por un pavimento bituminoso de espesor inferior a 15 cm, **firmes semiflexibles**, formados por capas de mezcla bituminosa, de espesor igual o superior a 15 cm sobre capas granulares no tratadas, **firmes semirrígidos**, compuestos por un pavimento bituminoso sobre una o más capas tratadas con conglomerantes hidráulicos y **firmes rígidos**, formados por pavimentos de hormigón.

El firme, además de requerir características resistentes, debe ser capaz de aportar ciertas propiedades funcionales tales como seguridad o comodidad para los usuarios, y no hay que olvidar las necesidades intrínsecas a la aplicación y puesta en obra. Entre las funciones principales que debe cumplir el firme se encuentran:

- **Resistir y transmitir la carga del tráfico rodado.** A través del espesor del firme se distribuyen las tensiones generadas por el tráfico de manera que a la explanada llegue una pequeña parte de ellas, compatible con su capacidad portante.
- **Proporcionar una superficie segura y cómoda** para los usuarios. Estas características se deben mantener durante el periodo de funcionamiento de la vía, por lo que serán necesarios trabajos de conservación y mantenimiento.
- **Resguardar la explanada de la intemperie**, especialmente de las precipitaciones y del agua en cualquiera de sus formas, ya que en determinados suelos produce una merma considerable en sus características resistentes, pudiendo provocar incluso deslizamientos de la explanada.

En la Tabla 1 se muestra de forma general todas las propiedades que deben cumplir las mezclas bituminosas, distinguiendo entre propiedades fundamentales y propiedades técnicas. Se entiende como propiedades técnicas aquellas características de los materiales que aseguran el cumplimiento de las propiedades funcionales y que son susceptibles de ser medidas.

Tabla 1. Propiedades técnicas de las mezclas bituminosas. Fuente: Metodología ALEAS [3]

PROPIEDADES FUNCIONALES DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS	PROPIEDADES TÉCNICAS
<p>SEGURIDAD</p> <ul style="list-style-type: none"> - Resistencia al deslizamiento - Regularidad transversal - Visibilidad <p>COMODIDAD</p> <ul style="list-style-type: none"> - Regularidad longitudinal - Regularidad transversal - Visibilidad - Ruido <p>DURABILIDAD</p> <ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de soporte - Resistencia a la desintegración superficial <p>MEDIO AMBIENTE</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ruido - Capacidad de ser reciclado <p>TRABAJABILIDAD</p>	<p>TEXTURA SUPERFICIAL</p> <p>CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA</p> <p>ABSORCIÓN DE RUIDO</p> <p>PROPIEDADES MECÁNICAS (en relación con el tráfico)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Resistencia a la fisuración por fatiga - Resistencia a las deformaciones permanentes - Módulo de rigidez - Resistencia a la pérdida de partículas <p>DURABILIDAD (en relación con el clima)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Resistencia al lavado por el agua - Resistencia a la fisuración térmica - Resistencia a la fisuración por reflexión - Resistencia al envejecimiento <p>TRABAJABILIDAD</p> <ul style="list-style-type: none"> - Compactabilidad - Resistencia a segregación árido grueso/fino - Resistencia a la segregación árido/ligante

Pero no todas las propiedades técnicas afectan a todos los materiales y/o a todas las capas, por lo que el paso de propiedades funcionales a técnicas debe hacerse por tipo

de mezcla y por capa en la que se encuentra. Actualmente, se diferencian cinco zonas dentro del firme en función de la tarea que desempeñan: Explanada, capa sub-base, capa de base, capa intermedia y capa de rodadura. Cada una de estas zonas puede estar compuesta por una o más capas. Dependiendo de la posición de la mezcla asfáltica, se requerirán unas características u otras:

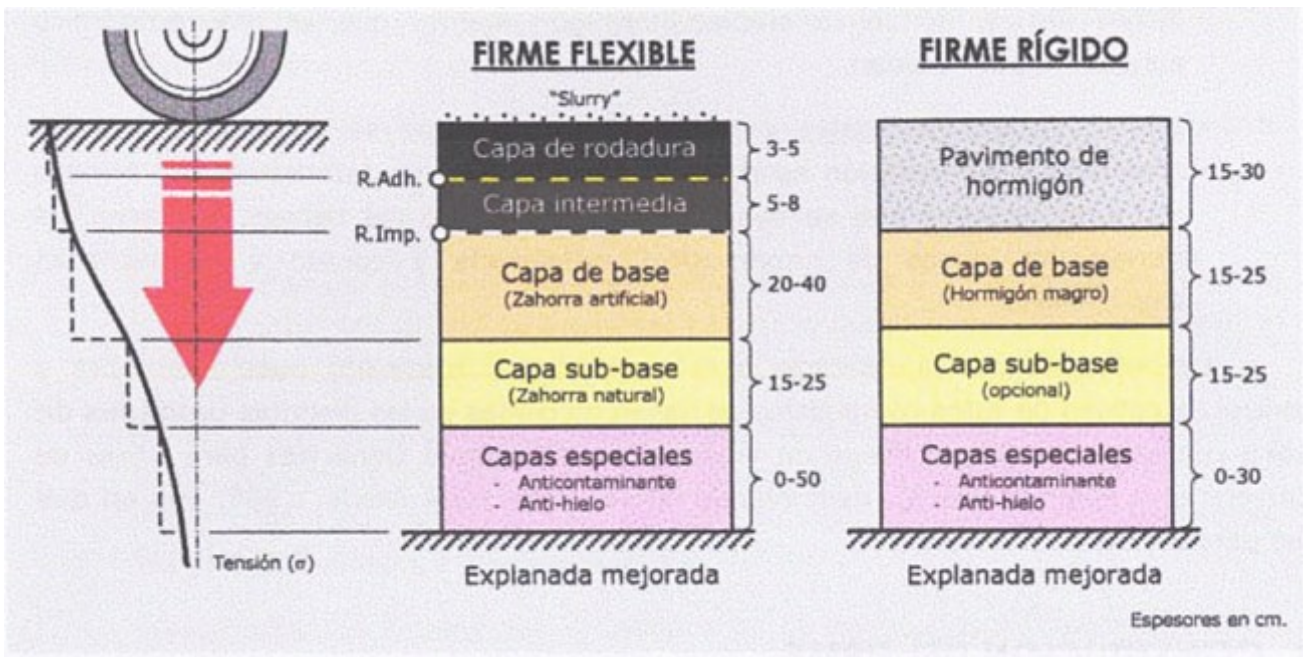


Figura 2. Capas que componen el firme flexible y firme rígido. Fuente: Manual de Carreteras [9]

4.1.1. Explanada

La explanada ejerce de cimiento de la carretera, su función es resistir las cargas transmitidas por el tráfico rodado. Sus características dependen mucho del material procedente de la excavación. Dota de una base uniforme para poder extender las mezclas bituminosas.

4.1.2. Capa sub-base

La función principal de esta capa es servir de asiento a la capa base, de forma que

se facilite la puesta en obra y compactación. Por tanto, no se requiere de materiales con grandes características. Esta capa debe ser drenante para evitar la acumulación de agua en las capas superiores del firme, para ello, es imprescindible que los materiales empleados (generalmente zahorras naturales) no tengan carácter impermeable, como es el caso de las arcillas. Debe facilitar la evacuación del agua, por lo que se dota de una pendiente de entorno al 4%.

4.1.3. Capa de base

La capa de base tiene una función fundamentalmente estructural, debiendo repartir y absorber prácticamente la totalidad de las cargas verticales, por lo que suele tratarse de espesores elevados para desarrollar adecuadamente esta labor. Por tanto, la capa de base debe presentar características fundamentalmente resistentes. Existen diferentes tipos de bases, que emplean uno u otro tipo de material en función de la calidad exigida por las solicitudes del tráfico:

- Bases granulares: Según su granulometría pueden ser continuas (zahorras) o discontinuas (macadam).
- Bases granulares estabilizadas: Se trata de bases más rígidas. Las más empleadas son las bases de gravacemento, pero también se emplean otras como el suelocemento, gravaemulsión, gravaescoria, etc.
- Bases bituminosas: compuestas a base de mezclas bituminosas en caliente o en frío, con dosificaciones mucho más bajas que las empleadas en las capas superiores.
- Bases especiales: Integradas por materiales obtenidos de procesos industriales tales como escorias de alto horno, áridos mejorados, etc.

Entre esta capa y la capa intermedia se suele aplicar un riego de imprimación que mejore el agarre entre las capas granulares y las bituminosas.

4.1.4. Capa intermedia

Debido a los grandes espesores típicos en las capas de base, se requiere de una

capa adicional, denominada capa intermedia, que permita conseguir una regularidad superficial nivelada y uniforme que sirva de apoyo a la capa de rodadura. Por lo que buscamos una capa estable con capacidad para soportar las sollicitaciones actuantes, ya que, aunque es la capa base la que mayores cargas soporta, una parte de éstas es afrontada por la capa intermedia.

Los problemas más habituales en este tipo de capas hacen referencia a una falta de resistencias a las deformaciones plásticas y a la acción del agua, por lo que las propiedades básicas prioritarias que se deben tener en cuenta en el diseño es la mejora de las mismas. La acción del agua provoca una falta de adhesividad entre el betún y el árido, lo que puede llevar a una desintegración y pérdida de la cohesión, es por ello por lo que será necesario realizar ensayos bajo condiciones de humedad.

Por consiguiente, las principales funciones que tienen asignadas las capas intermedias son las siguientes:

- Constituir una **superficie de apoyo** bien nivelada y uniforme sobre la que se pueda extender la capa de rodadura.
- **Transmitir los esfuerzos verticales** del tráfico atenuados a capas inferiores y acabando de absorber los horizontales, de forma que no alcancen las capas granulares. Por lo que debe ser **resistente y duradera**.

4.1.5. Capa de rodadura

La capa de rodadura es la capa superior del paquete de firme. Dada su posición, se encuentra en contacto directo con el paso de los vehículos y sometidas también a la acción de los agentes atmosféricos. Las funciones principales que debe cumplir son:

- **Buena adherencia** a los neumáticos en cualquier situación. Se consigue dotando a las mezclas de una macrotextura (efecto de la dosificación y tamaño máximo del árido) y microtextura (efecto del coeficiente de pulimento acelerado del árido) adecuadas.
- **Impermeabilidad**. Para impedir la penetración del agua superficial a las capas inferiores del firme y en la explanada.
- **Baja sonoridad**. El ruido de rodadura depende fundamentalmente del contenido de

huecos del material y del tamaño máximo de las partículas

- **Salpicaduras.** Comodidad en la circulación en lo relativo a la visibilidad nocturna, visibilidad en momentos de lluvia, etc, La visibilidad en momentos de lluvia del contenido de huecos y de la textura superficial y la visibilidad nocturna del contraste entre la marca vial y el pavimento, que es tanto mayor cuanto más negra sea la superficie (mayor contenido de ligante).
- **Regularidad superficial.** Esta cualidad depende fundamentalmente de la puesta en obra.

A veces se puede buscar funciones específicas como resistencia a los disolventes, resistencia al punzonamiento por cargas estáticas, etc.

4.1.6. Capas especiales

Dentro de este grupo se engloban aquellas que pueden ser necesarias en determinadas circunstancias climáticas o geológicas. Destacan:

- 1) Capas anticontaminantes: Cuando la explanada natural está formada por suelos de mala calidad, con un alto componente arcilloso u orgánico, se recurre al empleo de este tipo de capas que actúan a modo de filtro, impidiendo el paso de estos materiales a capas superiores.
- 2) Membranas y geotextiles: Este tipo de elementos han ido sustituyéndose a las capas anticontaminantes ya que son más ligeros y efectivos, consiguiendo aislar rigurosamente la explanada de las capas del firme
- 3) Capas anti-hielo: Se emplean en zonas de bajas temperaturas, donde el suelo está sujeto a un continuo proceso de congelación y descongelación.
- 4) Capas estabilizadas: En zonas de frecuentes lluvias puede ser necesario estabilizar con betún o cemento los últimos centímetros de la coronación de la explanada, para protegerla del agua y permitir el paso de la maquinaria de obra.

Por tanto, según la posición que vaya a desempeñar la mezcla bituminosa, serán necesarias unas propiedades técnicas u otras:

Tabla 2. Propiedades técnicas relevantes según posición de la mezcla. Fuente: Metodología ALEAS [3]

Propiedades técnicas	Significativa para			
	Rodadura	Intermedia	Base	Subbase
A. Resistencia al deslizamiento				
A.1. Macrotextura	X	-	-	-
A.2. Microtextura	X	-	-	-
B. Propiedades mecánicas (relacionadas con el tráfico)				
B.1. Resistencia a fatiga/iniciación de grietas	X	X	X	
B.2. Resistencia a la propagación de grietas	X	X	X	
B.3. Resistencia a la deformación permanente	X	X	X	
B.4. Módulo de rigidez	X	X	X	
B.5. Resistencia a la pérdida de partículas/general	1)	-	-	
B.6. Resistencia a la pérdida de partículas/neumáticos con clavos	2)	-	-	
C. Durabilidad (relacionadas con el clima)				
C.1. Resistencia al lavado por el agua	X	X	X	X
C.2. Resistencia al envejecimiento	X	-	-	-
C.3. Resistencia a la fisuración térmica	X	-	-	-
D. Propiedades relativas a la trabajabilidad				
D.1. Compactabilidad	X	X	X	X
D.2. Sensibilidad a la segregación/árido grueso/fino	X	X	X	X
D.3. Sensibilidad a la segregación/escurrimiento de ligante	X	-	-	-
E. Otras propiedades				
E.1. Conductividad hidráulica	1)	-	-	-
E.2. Absorción de ruido	2)	-	-	-

1) Sólo en mezclas drenantes

2) Sólo en zonas que permitan neumáticos con clavos

Por tanto, durante el diseño del tipo de firme a emplear, se busca conseguir la mezcla

óptima que cumpla con las necesidades a las que va a estar expuesta, tanto estructurales como funcionales, es decir, conseguir la combinación más eficiente de las características y proporciones de los elementos que conforman la mezcla bituminosa: granulometría del árido, porcentaje de ligante y aditivos.

4.2. AGENTES SOLICITANTES DE LOS FIRMES

Los principales agentes a los que está expuesto el firme son las condiciones climáticas de la zona y la carga de tráfico que debe soportar durante su vida útil.

➤ Condiciones climáticas

Cuando hablamos de afecciones por condiciones climáticas estamos haciendo referencia principalmente a la temperatura y a la humedad de la zona. La temperatura influye en la rigidez de la mezcla, ya que a medida que aumenta la temperatura, la capa superior del pavimento se vuelve menos rígida y cuando la temperatura desciende ocurre lo contrario, la rigidez del firme aumenta. Además, no se alcanza la misma temperatura en todo el espesor del firme, lo que produce un estado tensional que puede dañar al firme, fisurándolo. Con temperaturas altas la superficie del pavimento presenta compresiones (se contrae) y a bajas temperaturas tracciones (se dilata), mientras que en capas inferiores puede no darse el mismo caso.

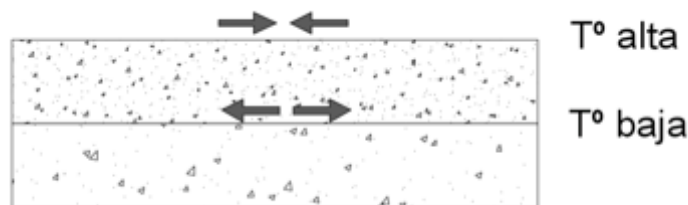


Figura 3. Tensiones generadas por variaciones térmicas. Fuente: Elaboración propia

La humedad puede afectar por dos razones, en primer lugar, debido a la influencia que tiene sobre la adhesividad entre materiales que componen el firme y por otro lado, los problemas que ocasiona como consecuencia de la infiltración en las capas inferiores, originando los posibles fallos en el firme (fisuración).

Además, el paso del tiempo produce una oxidación del ligante de la mezcla bituminosa, provocando un aumento de la rigidez y por tanto, de la fragilidad de la mezcla (volviéndose más susceptible a fallos por fisuración).

➤ **Carga generada por el tráfico**

El tráfico solicitante definirá la capacidad portante que deberá tener como mínimo el paquete de firme, por tanto, es un factor determinante a la hora de prediseñar la tipología de firme y las mezclas bituminosas que lo componen. Sin embargo, caracterizar la carga producida por el tráfico resulta bastante complejo, debido no solo a la variabilidad y periodicidad de los vehículos que lo solicitan, sino también a las interacciones vehículo-pavimento y velocidades de circulación que producen fenómenos con solicitaciones adicionales a las propias cargas estáticas de los vehículos.

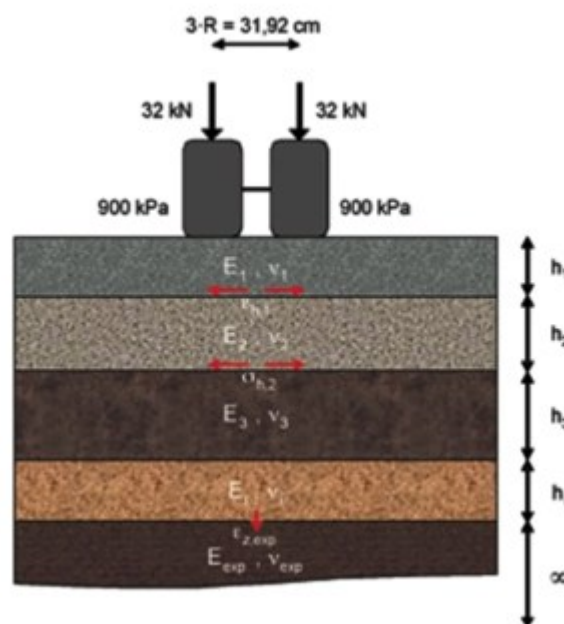


Figura 4. Carga generada por el tráfico. Fuente: Secciones de firme de la Comunidad Valenciana [4]

4.3. TIPOS DE DETERIOROS

El firme puede presentar una serie de deterioros de mayor o menor severidad que disminuyen la comodidad del usuario y la vida de servicio de la estructura. Los deterioros de los pavimentos asfálticos se deben a una serie de factores: condiciones climáticas (lluvia, gradientes de temperatura), carga generada por el tráfico, materiales o procesos de elaboración de las mezclas inapropiados y/o ejecución de la obra (transporte, extensión y compactación).

Los tipos de deterioros pueden clasificarse como deterioros de la superficie, estructurales y originados por una mala ejecución durante la construcción:

Tabla 3. Tipos de deterioros en firmes flexibles. Fuente: Elaboración propia a partir de [9], [10] y [11]

DETERIOROS DE LA SUPERFICIE	Desprendimientos	Pérdida de agregados (surcos)
		Pérdida de capa de rodadura (peladuras)
		Pérdida de la base
	Alisamientos	Exudación del ligante
		Desgaste de áridos
Exposición de agregados		
DETERIOROS DE LA ESTRUCTURA	Deformaciones	Roderas
		Canalizaciones (blandones)
		Baches profundos
		Ondulaciones
	Fisuración	Grietas longitudinales
		Grietas transversales
		Fisuras en bloque
		Fisuración por fatiga
		Fisuración de borde
		Reflexión de juntas
	DETERIOROS POR DEFECTOS CONSTRUCTIVOS	Segregación de la mezcla

En este caso, al tratarse de una mezcla para capa intermedia, se van a detallar solo los posibles fallos estructurales, especialmente los de fisuración:

4.3.1. Deformaciones



a) Rodera



b) Canalización



c) Bache



d) Ondulaciones

Figura 5. Deterioros estructurales. Deformaciones.

a) Roderas

Deformaciones del perfil transversal por hundimiento a lo largo de las rodadas, con elevaciones a cada lado de la rodada. Se asocia normalmente a una baja estabilidad de las mezclas. Las causas más comunes que llevan a este tipo de fallo son: un uso de ligante excesivo, tipos de ligantes blandos, uso de áridos redondeados y/o compactación deficiente de la base.

b) Canalizaciones

Deformación del perfil transversal, tanto por hundimiento a lo largo de las rodadas como por elevación de las áreas vecinas adyacentes a las rodadas. Las deformaciones

presentan una configuración más amplia que la rodera. La causa principal de este tipo de fallo suele ser la falta de capacidad estructural del pavimento empleado.

c) Baches

Hundimiento local de la calzada, con agrietamiento en malla cerrada y generalmente pérdida parcial de bloques de la capa de rodadura. Las causas más comunes suelen ser un mal drenaje, una estructura inadecuada o tratarse de un defecto constructivo.

d) Ondulaciones

Deformaciones del perfil longitudinal con crestas y valles regularmente espaciados a distancias cortas. Generalmente están acompañadas, en los sitios críticos, por grietas semicirculares. Las posibles causas se centran en contenido de ligante inadecuado, uso de áridos redondeados, utilización de ligantes blandos y/o frenado de vehículos pesados en intersecciones.

4.3.2. Fisuración

• Grietas longitudinales

Consiste en una rotura longitudinal sensiblemente paralela al eje de la carretera, con abertura mayor de 3 mm. Las causas más frecuentes que llevan a este tipo de fisuración del firme suelen ser: una ejecución inadecuada de las juntas longitudinales de construcción, uso de ligantes muy duros o envejecidos y/o un gradiente térmico superior a los 30°C.

Cuando la posición de la grieta se encuentra a lo largo del eje de la calzada se atribuye su causa a una mala ejecución de la junta de construcción durante las tareas de extendido de la mezcla bituminosa. En el caso de que se localicen en la zona de rodadura de los vehículos, su causa se atribuye a problemas de fatiga de la mezcla. Cuando las grietas se localizan en otras posiciones su origen se le atribuye a contracciones térmicas en el pavimento.

Estas fisuras pueden tratarse de una fisuración ascendente o descendente. En el primero de los casos, la causa principal suele ser el debilitamiento de las capas inferiores por problemas de fatiga de la mezcla. En el caso de tratarse de fisuras descendentes, su origen suele asociarse a problemas de tracción en la capa superficial, ya sea por gradientes

térmicos o por el paso de vehículos pesados con altas presiones de inflado de los neumáticos.



Figura 6. Fisuración longitudinal.

- **Grietas transversales**

Rotura transversal sensiblemente perpendicular al eje de la carretera, con abertura mayor de 3 mm. La principal causa que se atribuye a la aparición de este tipo de fisuras es el efecto térmico (gradientes superiores a 30°C) en pavimentos flexibles con mezclas bituminosas de alta rigidez, en las que aparecen tensiones de tracción en la superficie del pavimento. Otra de las causas posibles es la reflexión de las fisuras existentes en las capas inferiores.



Figura 7. Fisuración transversal.

- **Fisuras en bloque**

Rotura longitudinal o transversal, con abertura menor que 3 mm, y separación mayor que 15 cm. Este tipo de fallo es causado principalmente por las tensiones generadas por diferenciales térmicos, especialmente en mezclas bituminosas con módulos de rigidez muy altos, en las cuales se provocan retracciones superficiales que dan origen a este tipo de fallo. Otras causas posibles se atribuyen a la falta de espesor o fatiga de las capas del firme y a la reflexión de fisuras existentes en capas inferiores.

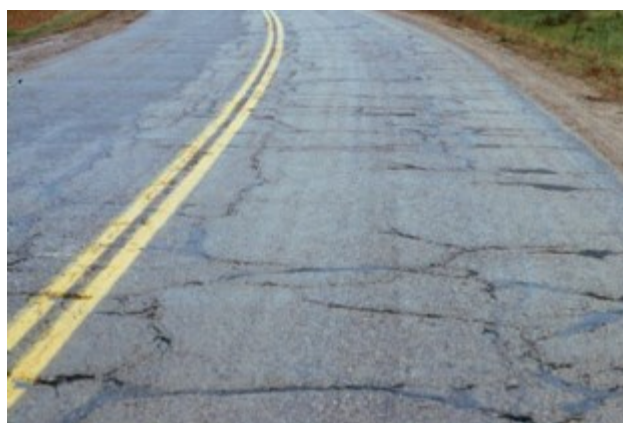


Figura 8. Fisuras en bloque.

- **Fisuración por fatiga**

Roturas longitudinales y transversales, con separación menor que 15 cm, y con abertura creciente según avanza el deterioro. Se trata de grietas interconectadas entre sí, formando trozos de ángulos agudos. Se suele conocer también como “piel de cocodrilo” y generalmente presenta hundimiento del área afectada. Este tipo de fallo ocurre en zonas sujetas a elevadas cargas de tráfico, de manera que la mezcla bituminosa pierde paulatinamente sus propiedades estructurales.

Al igual que en el caso de fisuración longitudinal, pueden tratarse de fisuras que se inician en las capas inferiores y van ascendiendo hasta la capa de rodadura (fisuración clásica de fatiga) o tratarse de fisuras que se inician y se propagan desde la superficie del pavimento hacia la base (fisuración por fatiga descendente). En el primero de los casos se origina como consecuencia de altas tensiones y deformaciones en la base de la capa bituminosa, mientras que en el segundo caso, por retracciones originadas como

consecuencia de gradientes térmicos o por el paso de tráfico de vehículos pesados con neumáticos con altas presiones de inflado.



Figura 9. Fisuras por fatiga de la mezcla

- **Fisuración de borde**

Este tipo de fisuración suele presentarse en forma de media luna en los bordes de aquellas calzadas que no cuentan con arcenes pavimentados. Su causa se atribuye a una base granular débil por falta de compactación y confinamiento. Otro factor que acelera este tipo de deterioro es la posible infiltración de humedad por un drenaje insuficiente que provoca la pérdida de la estabilidad en la base de la estructura del pavimento.



Figura 10. Fisuración de borde

- **Reflexión de juntas**

Este tipo de fisuración se caracteriza por la aparición de grietas que se producen en las capas bituminosas que refuerzan un pavimento de hormigón, coincidiendo con las juntas y grietas de éste. Estas fisuras progresan a medida que trabajan o se mueven las juntas del pavimento de hormigón ubicado en la capa inferior, reflejándose así la fisura en la superficie. También este tipo de fallo se produce en reposiciones bituminosas sobre antiguos pavimentos bituminosos con fisuras existentes, las cuales acaban reflejándose en al nueva capa superficial.



Figura 11. Fisuración por reflexión de juntas

4.4. ESTUDIOS REALIZADOS

En este apartado se muestra un análisis de las investigaciones y experiencias, tanto nacionales como internacionales, realizadas sobre el desarrollo y utilización de mezclas bituminosas discontinuas en caliente tipo SMA. Estas mezclas se caracterizan por poseer una gran cantidad de árido grueso, una elevada proporción de ligante y de polvo mineral, una baja cantidad de árido de tamaño intermedio (entre 2 y 4 mm) y una pequeña cantidad de aditivo estabilizante. Consiguiendo así un buen esqueleto mineral y una alta proporción de mástic rico en filler.

Este tipo de mezcla bituminosa se desarrolló en Alemania, a mediados del año 1960 como consecuencia de las rigurosas exigencias de los neumáticos de clavos utilizados durante las heladas, y se han empleado en Europa durante muchos años por su buen

comportamiento para resistir las acciones del tráfico y climatológicas.

Algunas de las investigaciones mostradas en este apartado coinciden en que la mezcla bituminosa tipo SMA se caracteriza por su excelente comportamiento a fisuración, como consecuencia de su alto contenido en mastic.

4.4.1. Investigaciones internacionales.

Un estudio desarrollado por Asi [12] en el que se comparaba una mezcla HMA (mezcla bituminosa en caliente) con 5,3% de betún convencional con una SMA con 6,9% de betún confirmó que, aunque las mezclas convencionales tienen mayores resistencias a compresión y a tracción, las mezclas SMA presentan mayor durabilidad y propiedades de elasticidad, lo que implica una mejora en la resistencia a la fisuración. Por lo que, el autor recomienda el uso de este tipo de mezclas en zonas de clima cálido.

Otro estudio dirigido por Moghadas Nejad et al. [13] comprobó la influencia del tamaño máximo de árido en propiedades como rigidez y fatiga de la mezcla. Se preparó la misma curva granulométrica para una mezcla convencional HMA y una tipo SMA con un betún convencional 60/70. Se concluyó que las propiedades tanto a fatiga como rigidez empeoran en el caso de SMA para el mismo tamaño máximo de árido en una temperatura de ensayo específica. El comportamiento a fatiga mejora para graduaciones de tamaño máximo de árido inferiores.

Estos dos estudios llevaron a la conclusión de la necesidad de emplear betunes modificados con altas prestaciones para lograr un mástic más duro en las SMA que aporte mejor resistencia a la deformación permanente. Esta fue la premisa del estudio realizado por Sengul et al. [14]. En este caso se compara la respuesta mecánica de una mezcla bituminosa tipo SMA 16 empleando un betún convencional 60/70 y un betún modificado con polímeros PMB. Se demostró una mejora sustancial en la tensión indirecta y deformación permanente, mejorando además la resistencia a fatiga.

Un estudio realizado por Qui, Y.F. et al. [15] ensayó la influencia del contenido de betún en las propiedades de mezclas bituminosas tipo SMA. Se diseñaron cuatro mezclas con porcentajes de betún de 5,5%, 6%, 6,5% y 7%, utilizando betún modificado con polímeros. Se concluyó que el porcentaje de betún tiene un impacto importante en la

deformación permanente de la mezcla SMA, con mayor influencia que la graduación del árido. Se observó que el contenido óptimo era de 5,5% para la dosificación de una SMA.

La experiencia entorno a las mezclas tipo SMA como capa de rodadura es muy amplia, pero no se dispone de tanta información cuando hacemos referencia a su respuesta como capa intermedia en el firme. Como se ha visto, las propiedades técnicas que se buscan en una mezcla asfáltica que pretende ser usada como capa intermedia difieren de las propiedades como capa de rodadura. A continuación, se muestran las experiencias internacionales de empresas que si han incluido las mezclas tipo SMA 16 como capa intermedia y las conclusiones a las que se han podido llegar.

- **Alemania**

Es el país de origen de la mezcla de estudio, su uso se remonta a mediados de 1970 cuyos investigadores pretendían reducir las deformaciones permanentes presentes en los pavimentos como consecuencia del uso de neumáticos con clavos. Durante muchos años su aplicación fue destinada a capas de rodadura, pero actualmente ya son varias las empresas que incorporan dicha mezcla como capa intermedia en el firme.

Una de las empresas con gran experiencia en la aplicación de SMA 16 como capa intermedia es JRS (J.Rettenmaier & Söhne GmbH Co). En la Tabla 4 se muestra un resumen de algunas de las obras realizadas por dicha empresa donde se ha empleado SMA como capa intermedia. En ella se muestra el espesor de la capa de firme, el tipo y porcentaje de betún empleado, el porcentaje de fibras utilizado, así como las características climáticas y de tráfico presentes en la zona.

De la tabla se pueden recoger dos aspectos, la primera es el porcentaje de betún empleado para la elaboración de una SMA dependiendo de la posición en el firme. En el caso de una mezcla para capa de rodadura el porcentaje de betún empleado es bastante mayor (6,5 - 7,2%) que si se trata de una mezcla para su uso como capa intermedia (5,1 - 5,7%).

Por otro lado, se observa el tipo de betún empleado dependiendo de las solicitaciones presentes (climatológicas y de tráfico) en la localización de la obra. Cuando se menciona Bk 100 (SV) corresponde a la clasificación alemana de autovías y autopistas con alta intensidad de tráfico.

Tabla 4. Registro obras realizadas por JRS con SMA como capa intermedia

LOCALIZACIÓN	FECHA	CAPA	MEZCLA	BETÚN	FIBRAS %	ESPESOR cm	T° °C	TRÁFICO Veh/día
Banden- Wuerttemberg (Alemania)	sept-93	RODADURA	SMA 8 S	PMB 45/80-50 A	0,30	3,5	15-35	Autovía Bk100 (SV)
		INTERMEDIA	SMA 16 B S	5,3% de PMB 25/55-55 A	0,20	8,5		
Möhrendorf / Bavaria (Alemania)	sept-08	RODADURA	SMA 8 S NR	6,5% de PMB 40/100-65 NV	0,30	2,5	15-34	Autovía Bk100 (SV)
		INTERMEDIA	SMA 16 B S	5,3% de PMB 25/55-55 A	0,20	7,5		
Roth / Bavaria (Alemania)	2010	RODADURA	PA 8 / PA 16	-	0,30	2,5 / 4,5	15-35	-
		INTERMEDIA	SMA 16 B C	5,7% de PMB 10-40/65 NV	0,20	8,5		
Berlín (Alemania)	mar-10	RODADURA	SMA 8 S	6,8-7,0% de PMB 25/55-55 A	0,30	4	15-35	Calles (Bk10)
		INTERMEDIA	SMA 16 B S	5,7% de PMB 25/55-55 A	0,20	8		
Berlín (Alemania)	oct-12	RODADURA	SMA 8 S	6,9-7,2% de PMB 25/55-55 NV	0,45	2,5	10-35	Calles (BK10)
		INTERMEDIA	SMA 16 B S	PMB 25/55-55 A	-	9		
Bavaria (Alemania)	sept-13	RODADURA	SMA plus 8	6,4% de PMB 10/100-65 A	0,30	-	08-34	-
		INTERMEDIA	SMA 16 B C	5,2% de PMB 10-40/65 A	0,20	-		
Bavaria (Alemania)	2014/ 2015	RODADURA	SMA 8 S	7,1-7,2% de PMB 25/55-55	0,40	-	08-34	Autovía Bk100 (SV)
		INTERMEDIA	SMA 16 B C	5,2% de PMB 10-40/65 A RC	0,20	-		
Hassen (Alemania)	2015	RODADURA	MA 11 S	B 30/45 NV	-	-	18-34	Autovía Bk100 (SV)
		INTERMEDIA	SMA 16 B S	5,1% de PMB 10-40/65 A	0,30	-		
Mecklenbur- Vorpommern (Alemania)	jun-15	RODADURA	SMA plus 8	6,6% de PMB 40/100-65	0,40	2,5	10-30	Autovía Bk100 (SV)
		INTERMEDIA	SMA 16 B C	5,6% de PMB 10/40-65 A	0,30	9,5		
Rhineland- Palantinate (Alemania)	sept-15	RODADURA	MA 8 S	-	0,30	3,5	15-40	Autovía Bk100 (SV)
		INTERMEDIA	SMA 16 B S	5,4% de PMB 10/40-65 RC	0,23	8,5		

- **Estados Unidos**

Las mezclas SMA fueron introducidas por primera vez en Estados Unidos en 1991, cuando un grupo de veintidós miembros que representaban AASHTO, NAPA, FHWA, TRIS, Asphalt Institute y SHIW realizaron un proyecto conjunto en busca de mejorar el rendimiento de las mezclas utilizadas en los Estados Unidos visitando seis naciones europeas. El proyecto consistió en estudiar y evaluar mezclas que se estaban empleando en Suecia, Alemania, Francia, Italia, Dinamarca y Reino Unido. De esta manera se inició un estudio para evaluar, a través de pruebas en laboratorio, las propiedades de las mezclas SMA con materiales de EE.UU. Desde entonces, poco a poco fueron siendo introducidas en los diferentes estados miembros.

Más tarde, Brown et al desarrolló en 1993 [16] un estudio de las primeras experiencias en EE.UU. con la utilización de SMA en 86 actuaciones, donde se demostró entre otras cosas que estas pavimentaciones eran más resistentes a la fisuración que las mezclas densas convencionales. Especificó que una mezcla denominada SMA es un tipo de asfalto de mezclas calientes clasificadas en intervalos que adquiere su resistencia a partir del esqueleto de piedra del agregado grueso. La fracción agregada gruesa de este tipo de mezcla requiere un mortero duradero y resistente a la humedad con un porcentaje de betún comprendido entre 5,5 y 7% e incorporando un aditivo estabilizante

- **Reino unido**

En países como Reino Unido, empresas como CEMEX UK [17] ya han incorporado la mezcla bituminosa en caliente SMA como capa intermedia con el fin de reemplazar firmes compuestos por capas gruesas de aglomerados envejecidos. Esta empresa menciona que, a medida que este diseño se ha puesto en práctica, las estrategias de mantenimiento han sufrido un descenso significativo en el Reino Unido, con el consiguiente ahorro tanto en la gestión de las autoridades locales como en el mantenimiento de carreteras nuevas. La empresa CEMEX UK denomina a este diseño como VIABASE.

4.4.2. Investigaciones desarrolladas en España.

En 2006 se redactó la primera normativa europea por la cual se homogeneizan los métodos de realización de las mezclas bituminosas en caliente tipo SMA, la UNE-13108. Esta norma europea especifica los requerimientos propios de los materiales constituyentes para el Mercado CE, pero se trata de criterios muy generales que deben ser especificados por cada país con la incorporación de un anejo adicional. En España no existe aún un Pliego de Prescripciones Técnicas particular para esta tipología debido a su poca aplicación práctica y, por tanto, a la incertidumbre existente en el comportamiento a largo plazo.

Ante la posible utilización en España de este tipo de mezclas bituminosas por sus excelentes características, las empresas: Eiffage, Elsan, Euroconsult, Rettenmaier Ibérica y Mantenimiento y construcción de Equipos de Auscultación, junto con CEDEX, Universidad Politécnica de Cataluña, Universidad de Castilla la Mancha y Eucat han desarrollado un proyecto de investigación denominado: “Diseño de Mezclas SMA, como capa de rodadura e intermedia, para su empleo en España”, realizado entre 2010 y 2012, y publicado por ASEFMA en 2012 (Comunicación 33) [18] y una aplicación práctica en un tramo experimental [19]. En ella se realiza el diseño y desarrollo de dos mezclas, una mezcla SMA 16 y otra SMA 11. La primera se desarrolla para su aplicación tanto en capa de rodadura como con la posibilidad de su empleo también en capa intermedia o base, mientras que la SMA11 se diseña para su empleo en capa de rodadura. Se comprueba su comportamiento frente a propiedades de durabilidad, mediante ensayos de fatiga y rigidez, así como a la resistencia a la propagación de fisuras.

El estudio se centra en la aplicación de las mezclas SMA como capa de rodadura, pero dada la posibilidad de diseñar las mezclas con varios husos granulométricos, su aplicación se puede extender a las capas intermedia y base, proporcionando de esta forma una estructura con mayor resistencia a la fisuración y un mejor comportamiento a la fatiga, aumentando su durabilidad. Por tanto, dado el interés de este estudio por su utilización como capa intermedia, nos centramos en los resultados obtenidos para la mezcla SMA16. Se han diseñado con dos tipologías de ligantes, un betún convencional B35/50 y un betún mejorado con caucho procedente de neumáticos fuera de uso BC35/50. Los áridos han sido de naturaleza silíceo y caliza. Se ha incorporado un porcentaje de fibras de celulosa del 0,3% s/m solo para las mezclas fabricadas con betún convencional, y con un total del 6%

de betún por peso de árido.

Tabla 5. Características empíricas y fundamentales de la mezcla SMA 16

MEZCLA	UNIDAD	MÉTODO DE ENSAYO	SMA16 Caliza B35/50	SMA16 Caliza BC35/50	SMA16 Sílice B35/50	SMA16 Sílice BC35/50
%betún/árido	%	UNE EN 12697-39			6	
Escurrimiento Shellenberg	Mét. %	UNE EN 12697-18			< 0,3	
Densidad aparente, S.S.S	Kg/m ³	UNE EN 12697-6			>2300	
Huecos mezcla	%	UNE EN 12697-8			4-5	
Huecos rellenos	%	UNE EN 12697-8			< 77	
Resistencia ITSR conservada	%	UNE EN 12697-12	83	86	84,5	86
Rodadura PRD	%	UNE EN 12697-22	5,24	3,435	4,84	3,26
Rodadura WTS	mm/h	UNE EN 12697-22	0,102	0,042	0,079	0,036
Rigidez (medio/ajustado)	MPa	UNE EN 12697-26 Anexo C	>3500	>2500	>3700	>2900
Fatiga	µm	UNE EN 12697-24 Anexo D	145	209	142	234
E max	%	UNE EN 12697-44	1,22	1,13	1,22	1,41
Tensión	N/mm ²	UNE EN 12697-44	3,47	4,09	4,45	4,32
Tensión de fractura	N/mm ^{3/2}	UNE EN 12697-44	21,2	24,98	27,14	26,38
Relación T/D		UNE EN 12697-44	2,83	3,57	3,65	3,06

Estas características han sido evaluadas a partir de tres métodos de ensayo correspondientes a:

- Medida de la resistencia a la deformación permanente por compresión cíclica triaxial según la norma UNE EN 12697-25
- Medida de la resistencia a la propagación de fisuras; ensayo SCB (semi circular bending test) según la norma EN 12697-44 y ensayo denominado método CEDEX. Para comprobar el efecto de la temperatura se realizaron ensayos a tres temperaturas 0,5 y 20°C.
- Medida de la resistencia a la propagación de fisuras.

Algunas de las conclusiones que se obtuvieron tras el estudio respecto a la utilización de una mezcla SMA16 como capa intermedia, cumpliendo simultáneamente con los requisitos establecidos en la norma europea EN 13108-5, han sido:

- Se ha definido un porcentaje óptimo de ligante en torno al 6% sobre áridos para diferentes tipos de betunes: convencionales B35/50 así como para un betún modificado con polvo de caucho de NFU tipo BC35/50.
- La evaluación del comportamiento a fatiga y a la fisuración ha constatado la mayor durabilidad de estas mezclas frente a las habitualmente empleadas en España.
- La mayor vida útil de las mezclas SMA, contribuye a unos beneficios económicos como consecuencia de un menor requerimiento de rehabilitación, aun cuando los costos iniciales sean más elevados.

Por otro lado, el mismo equipo de investigación realizó una segunda etapa con el objeto de desarrollar una mezcla más sostenible denominado “Mezclas SMA (Stone Mastic Asphalt) con alto contenido de ligante” [20]. En este caso, se diseñó una mezcla con un mayor contenido de ligante (alrededor del 9% en peso de árido), con un mayor contenido de huecos en mezcla (llegando hasta el 12%) tratando de conseguir un mejor comportamiento en cuanto a reducir el ruido de rodadura de los vehículos, con una reducción del consumo energético en su fabricación al fabricarlas con betún asfáltico o con emulsión en forma de mezclas templadas e incluso en frío. Además, se han diseñado incorporando tanto polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso como material procedente del fresado de firmes envejecidos. Pero, esta tipología de mezcla está enfocada

a su uso como capa de rodadura y por tanto los resultados se exceden del objeto de este estudio.

Estos dos estudios en torno a las mezclas SMA llevó al equipo de investigación a la redacción de una propuesta de Pliego de Prescripciones Técnica para esta tipología de mezcla bituminosa [21]. Los requisitos mencionados en esta propuesta junto con los especificados en la normativa europea se detallan a continuación:

- **Composición granulométrica** donde se definen unos límites dentro de los cuales se incluye la curva granulométrica:

Tabla 6. Husos granulométricos para SMA 16 (% en masa). Fuente: Normativa europea y Propuesta de Pliego

TIPO DE MEZCLA	ABERTURA DE LOS TAMICES (mm)							
	22	16	11,2	8	4	2	0,5	0,063
UNE-EN	100	90-100	55-80	35-55	17-35	15-25	10-18	6-10
Propuesta	100	90-100	--	--	--	15-30	--	5-12

- La norma europea define un **contenido mínimo de ligante** comprendido entre 5,0 y 7,6% de betún, con la posibilidad de corrección en función de la densidad de las partículas de los áridos. Según la propuesta de Pliego de Prescripciones Técnicas, este contenido aumenta hasta los 5,6% de betún sobre mezcla para SMA 16 como capa intermedia:

Tabla 7. Tipo de mezcla, espesor y contenido de ligante. Fuente: Propuesta de Pliego

TIPO DE CAPA	TIPO DE MEZCLA	ESPESOR (cm)	CONTENIDO MÍNIMO DE LIGANTE (%m/sm)
RODADURA	SMA 11	3-5	5,8
	SMA 16	4-8	5,8
INTERMEDIA	SMA 16	5-9	5,6

- Se describe la posibilidad de la incorporación de **aditivos** para los que es necesario definir cantidad y tipo. El rango habitual de uso de estos aditivos estabilizantes suele estar comprendido entre 0,3% y 1,0% sobre masa de la mezcla en los países europeos.
- **Contenido de huecos en mezcla** comprendidos entre 3-8% para los valores máximos y 1,5-6% para los mínimos. Según la propuesta de Pliego de Prescripciones Técnicas, el contenido de huecos en mezcla para una SMA 16 debería estar comprendido entre 5 y 7% de huecos.
- Los **huecos rellenos** de betún se especifican entre 77 y 92% como límite máximo y 71-86% para el límite mínimo, mientras que en la propuesta toma como límite un contenido máximo de 83% de huecos rellenos.
- Se determina el **porcentaje de escurrimiento de ligante**, estableciendo un intervalo de valores máximo entre 0,3-1%.
- Se evalúa la **sensibilidad al agua**, definiendo un intervalo con valores entre 90-60%. Sin embargo, la propuesta de Pliego de Prescripciones detalla el valor mínimo de resistencia conservada en función de la posición de la mezcla en el firme:

Tabla 8. Valores mínimos de sensibilidad al agua. Fuente: Propuesta de Pliego

TIPO DE CAPA	ITSR
CAPA DE RODADURA	≤90%
CAPA INTERMEDIA	≤85%

- Se muestra su comportamiento frente a las **deformaciones plásticas** estableciendo como intervalo máximo para WTS valores 0,03-1,0 mm y para la profundidad a la rodadura PRD valores máximos comprendidos entre 1,0-5%. La

propuesta de Pliego de Prescripciones indica:

Tabla 9. Pendiente media de deformación en pista (mm para 10^3 ciclos de carga). Fuente: Propuesta de Pliego

TIPO DE CAPA	ZONA TÉRMICA ESTIVAL	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
		T00 a T1	T2	T3, T4 y arcenes
RODADURA	CALIDA Y MEDIA	0,07		
	TEMPLADA	0,07	0,10	
INTERMEDIA	CALIDA Y MEDIA	0,10		
	TEMPLADA			

Por otro lado, la Universidad Politécnica de Cataluña ha realizado varios estudios a cerca del comportamiento de las mezclas bituminosas tipo SMA. Este es el caso del estudio desarrollado por Gallart F., 2011 titulado “Evaluación en laboratorio de la durabilidad de mezclas bituminosas tipo SMA” [22]. En el que evalúa la durabilidad de la mezcla mediante el ensayo de fatiga a flexotracción en cuatro puntos y dos ensayos desarrollados por el Laboratorio de Caminos de Infraestructura del Transporte y del Territorio de la Universidad Politécnica de Cataluña que son el ensayo FENIX y el EBADE. Se estudian dos mezclas de granulometría diferente, una SMA 11 y una SMA 16, con el mismo contenido de betún modificado PMB 45/80/65 y un 0,3% de fibras de celulosa tipo Viatop. El estudio demuestra la gran durabilidad y capacidad de resistencia a la fisuración por fatiga de las mezclas SMA.

Más tarde, otro estudio dirigido por Grillo S., 2012 titulado “Metodología para el diseño y la caracterización de mezclas bituminosas tipo SMA” [23] propone un procedimiento de evaluación de las mezclas bituminosas SMA. Las mezclas estudiadas fueron una SMA 16 con betún modificado con caucho, una SMA 11 con betún modificado con polímeros y una mezcla convencional AC 16. Los resultados manifiestan una mejor resistencia a fatiga de las mezclas SMA en comparación a la mezcla convencional.

Estos estudios previos indican, por tanto, que las mezclas bituminosas tipo SMA presentan una ductilidad muy superior a la de las mezclas convencionales tipo AC, lo que favorece su resistencia a la fisuración.

4.5. DIFERENCIAS ENTRE LA MEZCLA DE ESTUDIO SMA CON MEZCLA CONVENCIONAL AC

La **principal diferencia** entre las mezclas convencionales y la SMA está en el esqueleto estructural. La SMA contiene una composición granulométrica con una fuerte discontinuidad. La dosificación presenta entorno a un 70/80% de árido grueso en la mezcla, lo que proporciona un elevado contacto directo entre las partículas gruesas. De esta manera se aumenta la capacidad portante y la durabilidad de la mezcla. En el caso de las mezclas convencionales la composición de áridos es continua y con un porcentaje de árido grueso de 40 a 60 %, de manera que los huecos que conforman los áridos más gruesos se rellenan con áridos más pequeños. La durabilidad de la mezcla se controla principalmente por la cohesión y la fricción interna de la matriz.

HUSOS GRANULOMÉTRICOS AC 22 Y SMA 16

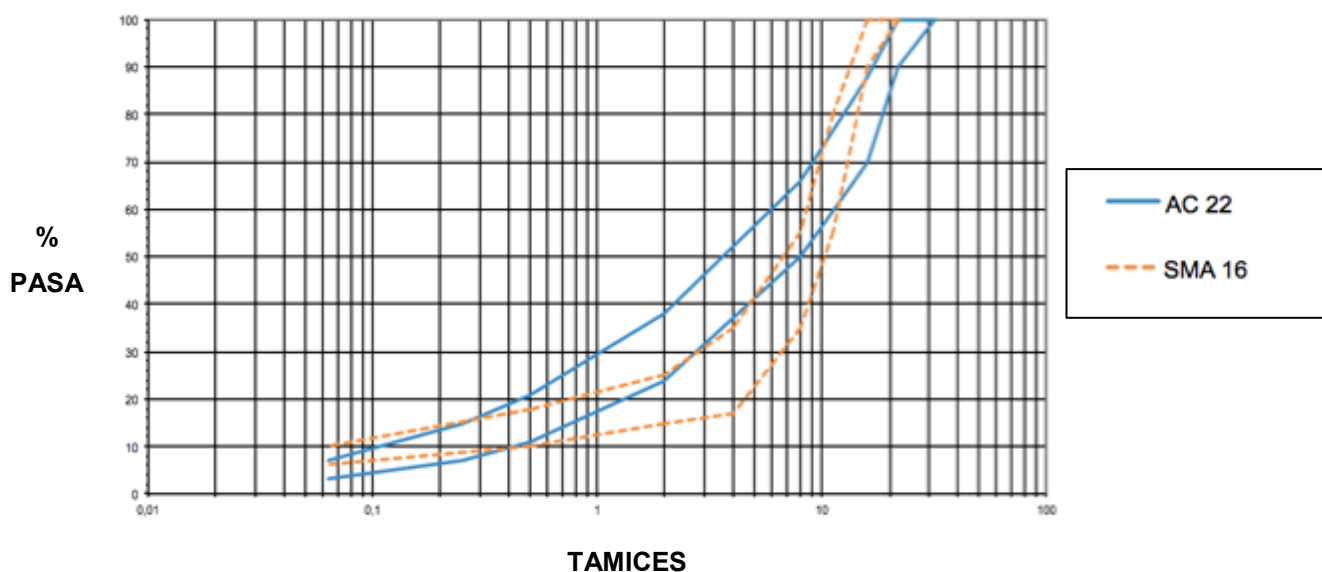


Figura 12. Curva granulométrica para una AC 22 y una SMA 16

La **segunda diferencia** radica en el contenido de ligante y filler. La mezcla base de estudio contiene entorno a un 5-6 % de betún sobre mezcla, mientras que la mezcla convencional suele rondar el 4,5%. Además, la dosificación de la SMA presenta una mayor

cantidad de filler, entorno a un 10% en comparación con entorno a un 3-7% de filler en las mezclas convencionales AC22 S.

Este aumento en la cantidad de betún y filler y la composición granulométrica anteriormente definida, influyen directamente en el contenido de huecos de la mezcla. Al poseer mayor cantidad de árido grueso, los huecos en el árido mineral (VMA) serán mayores al no contar con gran cantidad de árido de menor tamaño que los rellene. A su vez, como contiene mayor proporción de betún y filler, estos huecos serán rellenados por mástic y, por tanto, se obtendrá también unos huecos rellenos con ligante (VFB) mayores en la SMA que en una AC.

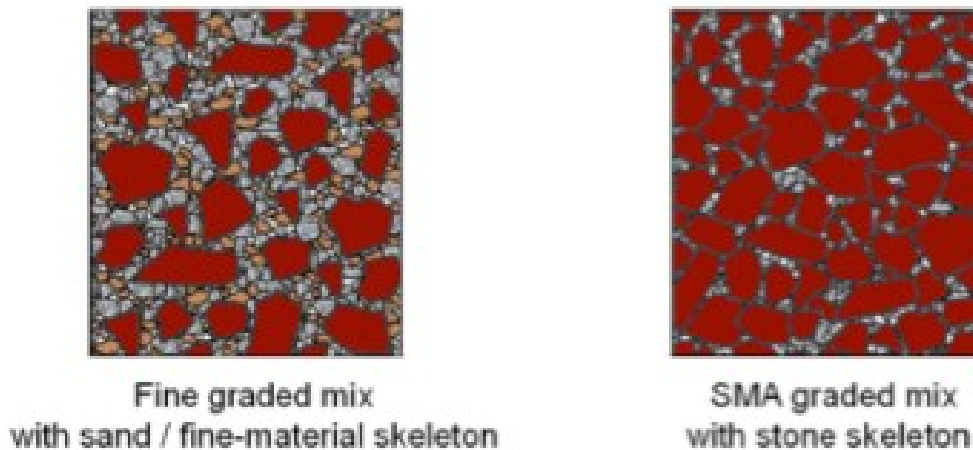


Figura 13. Esqueleto mineral en mezcla AC y SMA

La **tercera diferencia** es el uso de aditivos de estabilización en SMA que se atribuye al alto porcentaje de betún, cuya función es evitar el escurrimiento del mismo. Los aditivos generalmente utilizados son fibras orgánicas o minerales.

Estas tres diferencias proporcionan a la mezcla una elevada estabilidad a esfuerzos transversales y previene la disgregación de las partículas más gruesas. Según un estudio de EAPA publicado en 2007 [24], la vida útil media en Europa de las mezclas SMA se sitúa en 20 años, mientras que para las mezclas AC está en 14 años.

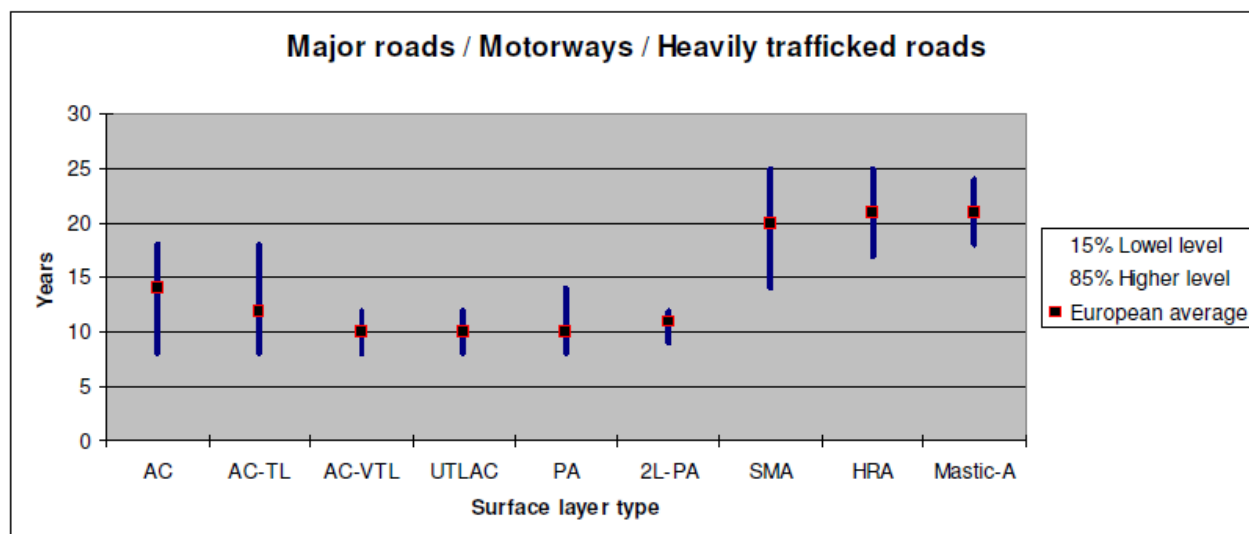


Figura 14. Vida útil de las autovías según el estudio [24]

CAPÍTULO 5. TRABAJO EXPERIMENTAL

5.1. INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo de este estudio ha sido necesaria la realización de trabajos experimentales en el Laboratorio de la EMPRESA CONSTRUCTORA PAVASAL S.A. situado en la provincia de Valencia. La metodología empleada para la realización de los ensayos correspondientes se ha llevado a cabo según rige la normativa europea UNE-EN 12697 “Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo”.

El trabajo experimental consiste en el diseño y caracterización de dos mezclas tipo SMA para su uso como capa intermedia, una con betún convencional B 35/50 y otra con betún modificado PMB 45/80-65. La respuesta de estas mezclas se comparará con una dosificación propia de la AC 22, al tratarse de la mezcla mayormente utilizada como capa intermedia en las carreteras españolas. Al tratarse de una mezcla para su uso como capa intermedia, las características mecánicas estudiadas serán las indicadas en la Tabla 2 “Propiedades técnicas relevantes según posición de la mezcla”: resistencia a la fatiga, a la fisuración, a las deformaciones permanentes, módulos de rigidez y sensibilidad al agua.

En este apartado se describen los materiales disponibles, el plan de trabajo llevado a cabo y la caracterización tanto de la mezcla SMA16 como de la mezcla patrón AC 22, describiendo en el último apartado los ensayos llevados a cabo para conocer la respuesta mecánica de las características anteriormente mencionadas. Se debe tener en cuenta que la mezcla bituminosa tipo SMA no se ha empleado como capa intermedia anteriormente y que, por tanto, no se conoce la dosificación que presenta unas prestaciones óptimas para el uso que se le pretende dar, por lo que será necesario incluir un estudio para determinar el porcentaje óptimo de betún.

Los ensayos realizados en laboratorio y los resultados obtenidos se recogen con mayor detalle en el *ANEXO 1 “Ensayos en laboratorio”*, donde se puede observar el procedimiento establecido para la caracterización tanto de las materias primas como de la mezcla.

Las mezclas que se presentarán en este estudio serán:

- AC 22 con betún convencional 35/50
- SMA 16 con betún convencional 35/50
- SMA 16 con betún modificado con polímeros PMB 45/80-65

En el caso de las mezclas convencionales AC 22 existe un Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares que rige las especificaciones y requerimientos a cumplir para su uso en España. Sin embargo, como ya se ha mencionado anteriormente, esto no es así para las mezclas SMA16, por lo que se deberá partir de unas hipótesis o características iniciales para determinar su dosificación.

5.1.1. Criterios de diseño para la mezcla patrón AC22 según PG-3

Las dosificaciones empleadas para las mezclas bituminosas de tipo hormigón bituminoso (AC) incluidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares (PG-3) deben cumplir una serie de especificaciones para ser aceptadas en obra. Estas características hacen referencia al contenido de huecos, resistencia a la deformación permanente y sensibilidad al agua.

- **Huecos**

Tabla 10. Contenido de huecos en mezcla en probetas. Fuente: Tabla 542.12 del PG-3

CARACTERÍSTICAS		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO			
		T00 Y T0	T1 Y T2	T3 y ARCENES	T4
HUECOS EN MEZCLA (%)	CAPA DE RODADURA	4 - 6		3 - 6	
	CAPA INTERMEDIA	4 - 6	4 - 7 (*)	4 - 7	4 - 7 (**)
	CAPA DE BASE	4 - 7 (*)	4 - 8 (*)	4 - 8	

(*) En las mezclas bituminosas de alto módulo 4-6 %

(**) En vías de servicio

- **Resistencia a la deformación permanente**

Tabla 11. Pendiente media de deformación en pista (WTSaire) y profundidad media (expresada en %) de la rodera (PRDaire) en el intervalo de 5.000 a 10.000 ciclos para capa de rodadura e intermedia. Fuente: Tabla 542.13.a del PG-3

ZONA TÉRMICA ESTIVAL	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				
	T00 Y T0	T1	T2	T3 y ARCENES	T4
CÁLIDA	≤ 0,07		≤ 0,07 (*)	≤ 0,10 (**)	
MEDIA	≤ 0,07	≤ 0,07 (*)	≤ 0,10 (**)	≤ 0,15	
TEMPLADA	≤ 0,10	≤ 0,10 (**)			

(*) Podrá aceptarse valores superiores al indicado si, simultáneamente, se cumple que WTS aire ≤ 0,10 y PRD aire < 5%

(**) Podrá aceptarse valores superiores al indicado si, simultáneamente, se cumple que WTS aire ≤ 0,15 y PRD aire < 5%

El ensayo se realizará de acuerdo a la Norma UNE-EN 12697-22 “Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Ensayo de rodadura”, mediante el ensayo en aire con procedimiento B y dispositivo de tamaño pequeño, a una temperatura de sesenta grados Celsius (60°C) y con una duración de diez mil ciclos (10.000).

- **Sensibilidad al agua**

Se debe comprobar la adhesividad árido-ligante mediante la caracterización de la acción del agua. Para ello, la resistencia conservada en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión, realizado a quince grados Celsius (15°C), tendrá un valor mínimo del ochenta por ciento para

capas de base e intermedias ($ITSR \geq 80\%$), según rige la norma UNE-EN 12697-12. Las probetas se deberán preparar con cincuenta (50) golpes por cara conforme la norma UNE-EN 12697-3.

5.1.2 Hipótesis de diseño para mezcla tipo SMA.

Las mezclas tipo SMA, al tratarse de una mezcla novedosa, no están incluidas en el PG-3 y, por tanto, no pueden tomarse los criterios establecidos en el mismo. La mezcla SMA se caracteriza por poseer una gran cantidad de árido grueso, elevada proporción de ligante y polvo mineral y baja cantidad de árido de tamaño intermedio, permitiendo obtener una mezcla más cerrada e impermeabilizante que mejore la durabilidad de la misma.

Por tanto, un aspecto importante en el diseño inicial de una mezcla bituminosa tipo SMA serán los huecos, ya que este valor refleja el espacio del que dispone el betún para expandirse cuando aumente la temperatura de la mezcla. Con un contenido bajo de huecos, el betún al dilatarse tenderá a separar los áridos pudiendo formar roderas en la mezcla y aparecer exudaciones en la superficie. El contenido mínimo de huecos para permitir esta dilatación es del orden del 3-4%. Por otro lado, los huecos en mezcla no deben superar un valor máximo para que el material no sea excesivamente permeable al agua ni al aire, ya que puede afectar a la adherencia árido-ligante y al envejecimiento del material. Por tanto, para este estudio se partirá de un rango de huecos aire de entre 3-6 % y huecos rellenos de más del 70 %, buscando conseguir una mayor flexibilidad de la mezcla de estudio, entrando dentro de los límites generales indicados en la norma UNE-EN 13108-5.

Por otro lado, la resistencia a la deformación permanente se establece como límite un valor de WTS aire de 0,07 (*) para la categoría de tráfico más restrictiva que sería la T00, ya que al tratarse de una mezcla con mayor porcentaje de ligante la resistencia a la deformación permanente se verá afectada. Por último, el valor de sensibilidad al agua debe ser superior al 80%, tal y como se indica en el Pliego de Preinscripciones para mezclas en capas intermedias.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, la hipótesis de diseño para una SMA 16 quedaría:

Tabla 12. Hipótesis de diseño para mezclas tipo SMA

CAPA INTERMEDIA	SMA 16
HUECOS EN MEZCLA (%)	3-6
RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE	$\leq 0,07$ (*)
SENSIBILIDAD AL AGUA - ITSr (%)	$\geq 80\%$

(*) Podrá aceptarse valores superiores al indicado si, simultáneamente, se cumple que WTS aire $\leq 0,10$ y PRD aire $< 5\%$

En este apartado se establecen unos criterios de partida que servirán de base para la caracterización de la mezcla SMA, pero que deberán ser redefinidos una vez ha finalizado el estudio.

5.2. PLAN DE TRABAJO

El objetivo general del proyecto es investigar acerca de la viabilidad del empleo de mezclas bituminosas en caliente tipo SMA (Stone Mastic Asphalt) para su empleo como capa intermedia del firme, en vías de alta sollicitación de tráfico.

Tras la revisión del estado del arte, se han establecido una serie de hipótesis que se corroborarán o rechazarán tras el desarrollo del siguiente documento. Por tanto, se parte de la idea de que las mezclas bituminosas en caliente tipo SMA (Stone Mastic Asphalt) presenta unas características mecánicas mejoradas en comparación con las obtenidas a partir de la mezcla convencional de tipo AC en:

- Mayor resistencia a la fisuración de las mezclas.
- Mayor resistencia a la fatiga.
- Mayor resistencia a la deformación permanente con betún modificado.

Debido a estas características, las mezclas SMA se presentan como una posible solución a la problemática existente de reflexión de fisuras en el firme mediante su empleo

como capa intermedia en el firme. Para poder corroborar estas hipótesis, el proyecto debe acometer una serie de tareas que permitan obtener resultados de una manera efectiva. Este conjunto de tareas ha sido englobado en 4 fases:

1º Fase

- Selección y análisis de las mejores materias primas para la fabricación de estas mezclas.

2º Fase

- Caracterización de las mezclas de estudio. En el caso de la SMA, al ser una mezcla novedosa, se deberá realizar el estudio para diferentes porcentajes de betún, ya que interesa conocer la influencia del contenido de betún en las características físicas y mecánicas de la mezcla y así poder evaluar las características óptimas para su uso como capa intermedia. Se realizarán ensayos para contenidos de betún de 5,1% 5,6% y 6,1%. Evaluando características volumétrico, características de deformaciones plásticas, sensibilidad al agua, resistencia a la fatiga (Ensayo de fatiga), resistencia a deformaciones permanentes (Ensayo de pista) y resistencia a la reflexión de fisuras (Ensayo SCB).
- Caracterización de la mezcla patrón AC 22 con la que compararemos los resultados obtenidos de la mezcla de estudio SMA.

3º Fase

- Una vez han sido evaluadas las mezclas con contenidos de betún diferentes, se deberá analizar y comprobar el porcentaje de betún óptimo para la aplicación que se le pretende dar a la mezcla. Esta fase es muy importante debido a la gran variación que produce el contenido de betún en las propiedades.

4º Fase

- Evaluación de conclusiones. Se realizará un análisis de las respuestas obtenidas durante los diferentes ensayos en comparación con las recogidas de la mezcla habitualmente empleada como capa intermedia. Se comprobará la dosificación óptima para su uso en un tramo de autovía de la Comunidad Valenciana.

La mezcla de estudio pretende sustituir a la comúnmente empleada como capa intermedia AC22 en las autovías de la Comunidad Valenciana (Denominadas antiguamente como S-20). Por tanto, tomaremos los valores límite que deben cumplir las características técnicas de mezclas situadas en zona estival media y con cargas de tráfico desde T1 hasta T00. La metodología que se va a seguir durante el estudio para la obtención de las características técnicas de la mezcla de estudio será, por tanto:

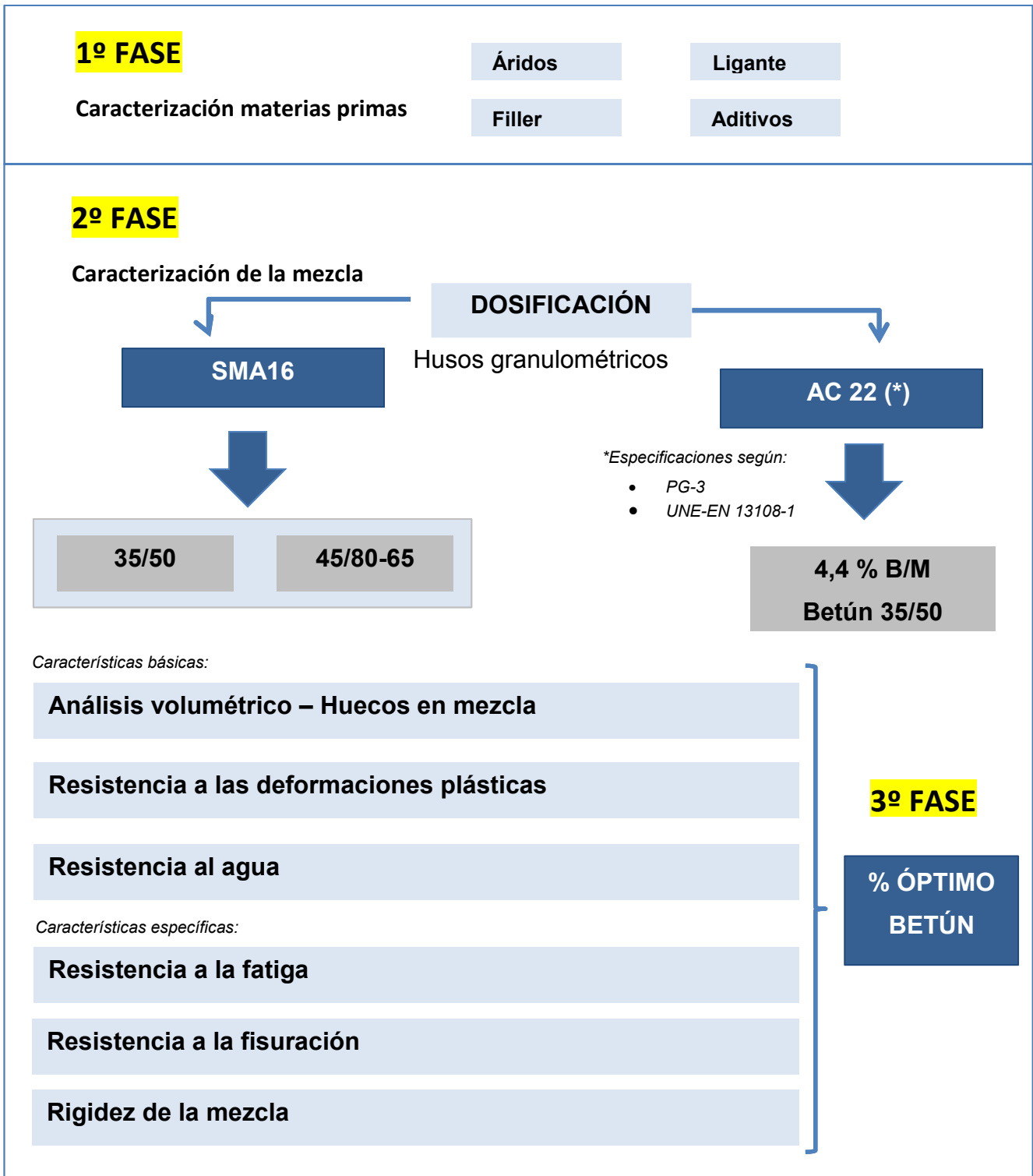


Figura 15. Esquema de trabajo. Fuente: Elaboración propia

5.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

5.3.1. Áridos

Los áridos utilizados para todas las mezclas proceden de la cantera propiedad de la empresa CAPLANSA situada en el municipio de Chilches, provincia de Castellón en la Comunidad Valenciana, España. Los áridos, de naturaleza caliza, son suministrados a la planta de aglomerado de la empresa PAVASAL situado en el mismo municipio, tal y como muestra la Imagen 16.



Figura 16. Ubicación cantera CAPLANSA y planta PAVASAL. Vista aérea.

Cumpliendo con las Normas Europeas EN 933 “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos” y la EN 1097 “Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos”, los datos obtenidos han sido:

Tabla 13. Análisis granulométrico áridos de la planta de Chilches. Fuente: Elaboración propia

TAMIZ (Luz mm)	FRACCIÓN			
	0/2 % PASA	4/10 % PASA	10/20 % PASA	16/32 % PASA
40,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,50	100,0	100,0	100,0	98,3
25,00	100,0	100,0	100,0	95,8
22,40	100,0	100,0	97,0	86,4
20,00	100,0	100,0	88,7	31,1
16,00	100,0	100,0	41,4	4,1
14,00	100,0	100,0	27,7	0,7
12,50	100,0	98,8	16,0	0,1
11,20	100,0	98,7	9,8	0,1
10,00	100,0	86,5	3,0	0,1
8,00	100,0	18,4	0,4	0,1
6,30	100,0	2,6	0,4	0,1
5,60	100,0	1,8	0,4	0,1
4,00	100,0	1,4	0,4	0,1
2,00	91,2	1,4	0,4	0,1
1,00	58,7	1,4	0,4	0,1
0,50	44,6	1,4	0,4	0,1
0,25	34,8	1,4	0,4	0,1
0,125	22,2	1,2	0,3	0,1
0,063	14,5	0,4	0,1	0,1

Tabla 14. Características de los áridos suministrados por CAPLANSA. Fuente: Elaboración propia

CARACTERÍSTICAS	NORMA UNE-EN	FRACCIÓN			
		0/2	4/10	10/20	16/32
D.RELATIVA APARENTE DE PARTÍCULAS	1097-6	2,716	2,794	2,815	2,815
D. APARENTE DE PARTÍCULAS TRAS SECADO	1097-6	2,662	2,717	2,767	2,742
DENSIDAD DE PARTÍCULAS SATURADAS	1097-6	2,685	2,748	2,787	2,771
DENSIDAD DE PARTÍCULAS PRESECADAS	1097-6	0,610	0,603	0,540	0,569
% ABSORCION	1097-6	0,85	1,12	0,72	1,05
COEFICIENTE DESGASTE DE LOS ANGELES	1097-2	--	21,6	21,6	--
INDICE DE LAJAS	933-3	--	9,7	10,3	7,0
CARAS DE FRACTURA	933-5	--	100,0	100,0	100,0
MEDIA DEL EQUIVALENTE DE ARENA SE_4	933-8	57,6	--	--	--

5.3.2. Polvo mineral-filler

El polvo mineral utilizado es filler de aportación de la misma naturaleza que el árido, procedente de la fracción fina de los mismos ($< 0,063$ mm). Cumpliendo con las especificaciones marcadas en la norma UNE EN 933-2 “Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas”.

La densidad del filler en tolueno según el ensayo UNE EN 1097-3 es:

Tabla 15. Densidad aparente del filler utilizado en la planta de Chilches. Fuente: Elaboración propia

DENSIDAD APARENTE DEL FILLER EN TOLUENO (g/cm^3)	0,678
--	-------

5.3.3. Ligante

Los tipos de ligante que se han utilizado son: betún convencional B35/50 y betún modificado con polímeros elastoméricos PMB 45/80-65, considerados en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, PG-3, para su uso como capa intermedia con categoría de tráfico T00 en zona térmica estival media (Valencia) (Artículo 542 del PG-3).

ZONA TÉRMICA ESTIVAL	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO					
	T00	T0	T1	T2 y T31	T32 y ARCENES	T4
CÁLIDA	35/50 BC35/50 PMB 25/55-65 PMB 45/80-65	35/50 BC35/50 PMB 25/55-65 PMB 45/80-60 PMB 45/80-65	35/50 50/70 BC35/50 BC50/70 PMB 45/80-60	35/50 50/70 BC35/50 BC50/70 PMB 45/80-60	50/70 BC50/70	50/70 70/100 BC50/70
MEDIA	35/50 BC35/50 PMB 45/80-60 PMB 45/80-65	35/50 50/70 BC35/50 BC50/70 PMB 45/80-60	50/70 BC50/70 PMB 45/80-60	50/70 BC50/70 PMB 45/80-60	50/70 70/100 BC50/70	
TEMPLADA	50/70 BC50/70 PMB 45/80-60 PMB 45/80-65	50/70 70/100 BC50/70 PMB 45/80-60				

Figura 17. Ligante hidrocarbonado a emplear para capa de rodadura y siguiente. Fuente: Tabla 542.1.a del PG-3

Se opta por utilizar estos dos tipos de betunes dado que, la mezcla patrón utilizada como capa intermedia a la que pretende sustituir, AC22, se dosifica con betún convencional y, por otro lado, se utiliza un betún modificado de consistencia y punto de reblandecimiento medio con el fin de conseguir unas características mecánicas mejoradas. De esta manera, se podrá

realizar un estudio comparativo de la respuesta observada en las diferentes dosificaciones, con el fin de determinar el betún óptimo para el uso que se le pretende dar a la mezcla.

La Normativa Europea establecida corresponde a la EN 12591 “Betunes y ligantes bituminosos. Especificaciones para pavimentación” y EN 14023 “Betunes y ligantes bituminosos. Estructura de especificaciones de los betunes modificados con polímeros”.

Los ligantes utilizados en planta proceden de REPSOL LUBRICANTES Y ESPECIALIDADES S.A. (Madrid), cuyos informes reflejan las siguientes características:

Tabla 16. Características del betún utilizado en la planta de Chilches. Fuente: Elaboración propia

CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	TIPO DE BETÚN			
		B 35/50		PMB 45/80-65	
		Rango	Valor	Rango	Valor
Penetración a 25°C	x 0,1 mm	35-50	45,0	45-80	47,0
Índice de penetración	-	-1,5 a +0,7	-0,85	-	-
Punto de reblandecimiento	°C	50-58	52,4	≥65	67,4
Recuperación elástica a 25°C	%	-	-	≥70	90,0

5.3.4. Fibras

Las fibras se emplean como estabilizante en las mezclas SMA, con el fin de prevenir el escurrimiento del betún. Su utilización es necesaria en aquellas mezclas cuyo porcentaje de ligante utilizado es superior a la superficie específica de árido capaz de adsorber. La tipología de fibras utilizadas se denomina VIATOP PREMIUM, procedentes de la empresa JRS (J. Rettenmaier & Söhne GmbH & Co), Alemania. Estas fibras están compuestas por un 90% en peso de fibras ARBOCEL y 10% de betún asfáltico. Las características que se detallan en los informes aportados son:

Tabla 17. Características de las fibras suministradas por JRS. Fuente: Elaboración propia a partir del informe suministrado por el proveedor.

CARACTERÍSTICAS DE LAS FIBRAS VIATOP PREMIUM	
Contenido en ARBOCEL	90 ± 3 %
Longitud media del gránulo	2-8 mm
Grosor medio	4 ± 1 mm
Densidad aparente	470 – 540 g/l
Análisis granulométrico	Máx. 10%

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

CARACTERÍSTICAS DEL BETÚN UTILIZADO	
Penetración a 25°C	50-70
Punto de reblandecimiento en °C	46-54

El reparto debe ser homogéneo, buscando un esqueleto mineral en el que predomine un árido envuelto en mástic.

5.4. DETERMINACIÓN ÓPTIMO BETÚN PARA MEZCLA SMA

La selección del contenido de ligante se realiza a partir del análisis del efecto de su variación sobre las propiedades de la mezcla. Es importante considerar que no siempre el aumento del contenido de ligante es beneficioso, ya que hay propiedades que pueden resultar

altamente perjudicadas al aumentar su contenido, como ocurre por ejemplo con la resistencia a las deformaciones plásticas. Por tanto, para la selección del óptimo de betún se deben analizar al mismo tiempo dos propiedades contrapuestas, una que mejore con el contenido de betún y otra que empeore. La resistencia a la acción del agua, resistencia a la reflexión de fisuras y resistencia a la fisuración (fatiga) aumenta con el % de ligante, mientras que el módulo de rigidez y la resistencia a deformaciones plásticas empeora al aumentar % de ligante.

De este modo, se seleccionará un contenido de betún que permita obtener el mejor comportamiento de las diferentes características técnicas requeridas para su uso.

INFLUENCIA DEL % DE BETÚN EN LAS PROPIEDADES DE LA MEZCLA	
↑ BETÚN	↓ BETÚN
MENOR % HUECOS	MAYOR % HUECOS
MEJORA DE LA RESISTENCIA A LA ACCIÓN DEL AGUA	MEJORA DE LA RESISTENCIA A DEFORMACIONES PLÁSTICAS
MEJORA DE LA RESISTENCIA A FATIGA DE LA MEZCLA	
MEJORA DE LA PROPAGACIÓN DE FISURAS	MEJORA DEL MÓDULO DE RIGIDEZ

Figura 18. Propiedades contrapuestas en la determinación del óptimo de betún. Fuente: Elaboración propia

El proceso que se lleva a cabo para determinar la dosificación óptima resulta:

1º Análisis volumétrico

Se realiza el análisis volumétrico de la mezcla, independientemente del tipo y posición en el firme, ya que siempre es conveniente determinar las características de la mezcla relativas

a su contenido de huecos en mezcla y huecos en árido. Estos parámetros permiten interpretar mejor los resultados de los ensayos mecánicos y tomar decisiones a la hora de cambiar su composición granulométrica.

Los límites establecidos en la hipótesis de diseño son de entre 3 y 6% de huecos árido y buscando conseguir unos huecos rellenos superiores al 70%.

2º Deformación permanente y sensibilidad al agua

Se comprueban las propiedades que resultan de los ensayos de resistencia a las deformaciones plásticas y resistencia a la desintegración y pérdida de cohesión por el efecto del agua. Se toman estos datos en segundo lugar debido a que representan los problemas más significativos detectados en el firme. Como se ha indicado anteriormente, se tomarán los valores exigidos en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales (PG-3) para su uso como capa intermedia con una categoría de tráfico T00 y en zona térmica estival media (Valencia), es decir, unos valores de WTS de 0,07 (*) y sensibilidad al agua superior al 80%.

(*) Podrá aceptarse valores superiores al indicado si, simultáneamente, se cumple que WTS aire $\leq 0,10$ y PRD aire $< 5\%$.

3º Propiedades específicas

Posteriormente se recogen propiedades específicas de la capa a la que va a pertenecer la mezcla, en este caso como capa intermedia. Por tanto, se comprueban las características de resistencia a la fatiga, capacidad portante y resistencia a la propagación de fisuras. Estas propiedades se evaluarán posteriormente en el Capítulo 6 “Resultados y análisis”.

5.4.1. Dosificaciones de estudio

En la Tabla 18 se muestra la dosificación empleada para cada una de las seis mezclas de estudio de SMA 16. Como se puede comprobar la curva granulométrica y el contenido de fibras en mezcla es prácticamente el mismo para todas ellas, cambiando únicamente el porcentaje de betún proporcionado y el tamaño de árido intermedio:

Tabla 18. Dosificaciones de estudio para comprobar el óptimo de betún. Fuente: Elaboración propia

		SMA 16 B 35/50			SMA 16 BM 45/80-65		
Betún	%	5,1	5,6	6,1	5,1	5,6	6,1
Filler	%	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	3,5
Fracción 0/2	%	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8	16,8
Fracción 4/10	%	53,6	53,1	52,6	53,6	53,1	52,6
Fracción 10/20	%	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0
Fibras/ mezcla	%	0,3			0,3		

A modo de ejemplo se muestra la curva granulométrica de la dosificación de una mezcla de ellas, entendiendo que para el resto de casos la curva sería muy parecida.

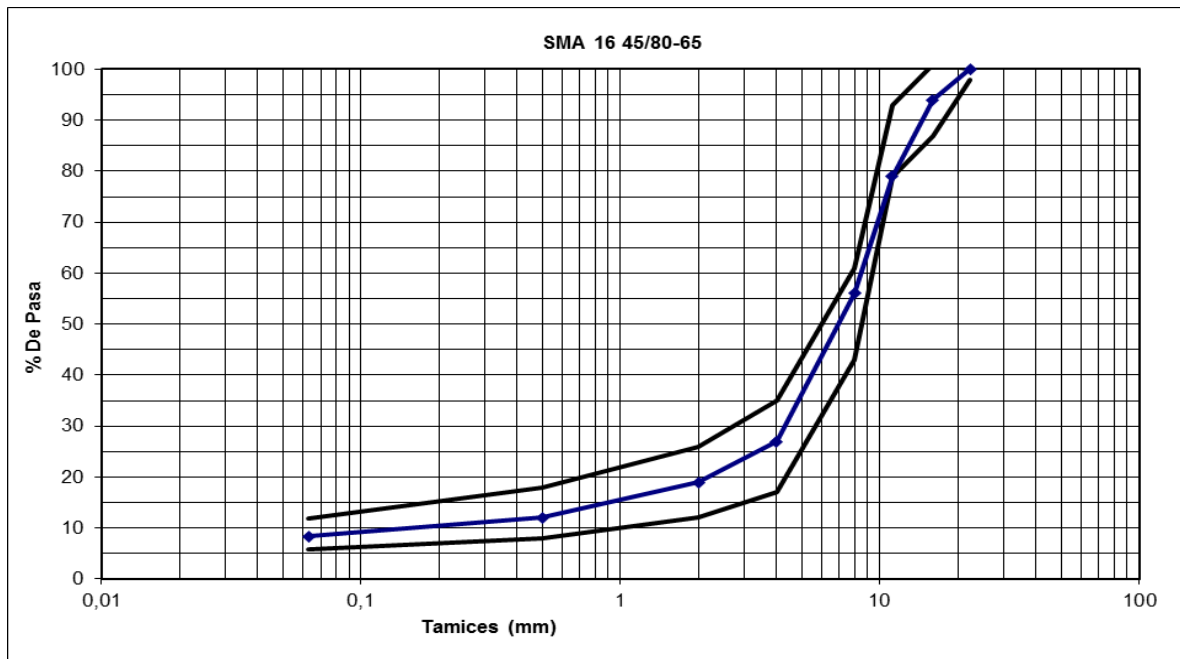


Figura 19. Curva granulométrica para una SMA 16 con 6,1% de Betún modificado

5.4.2. Análisis volumétrico

El análisis volumétrico se obtiene a partir del contenido de huecos presentes en la mezcla. Para ello, se debe conocer la densidad aparente y la densidad máxima de la mezcla. La densidad aparente se define como la masa por unidad de volumen, incluidos los huecos de aire, de una probeta bituminosa. Esta densidad se obtiene según la norma UNE-EN 12697-6 “Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas”. La densidad máxima, definida como la masa por unidad de volumen, sin huecos de aire, de una mezcla bituminosa a una temperatura de ensayo conocida, se obtiene siguiendo la norma UNE-EN 12697-5 “Determinación de la densidad máxima”. Para el cálculo del contenido de huecos se ha seguido la normativa UNE EN 12697-8 “Determinación del contenido de huecos en las probetas bituminosas”.

Tabla 19. Análisis volumétrico para comprobar el óptimo de betún

		SMA 16 B 35/50			SMA 16 BM 45/80-65		
Betún	%	5,1	5,6	6,1	5,1	5,6	6,1
Densidad máxima	Kg/m ³	2551	2545	2537	2556	2518	2524
Densidad aparente	Kg/m ³	2396	2417	2422	2422	2416	2436
Huecos aire	%	6,1	5,0	4,5	5,2	4,1	3,5
Huecos áridos	%	18,6	18,2	18,9	17,2	17,2	17,9
Huecos mezcla	%	66,1	72,3	76,0	69,6	76,4	80,4

5.4.3. Deformación permanente y sensibilidad al agua

La resistencia a las deformaciones permanentes se obtiene por medio del ensayo de rodadura. Este ensayo determina la susceptibilidad de los materiales bituminosos a deformarse cuando están sometidos a carga. Esta susceptibilidad se evalúa a partir de la rodera que se forma como consecuencia de pasadas repetidas, a temperatura constante, de una rueda sometida a carga. La profundidad de la rodera se determina a partir de la reducción en el espesor de la probeta, en milímetros.

Los valores que se muestran son el WTS aire, que corresponde a la pendiente de la deformación en pista, calculada como velocidad media de aumento de la profundidad de la rodera, con pasadas repetidas de una rueda sometida a carga ($\text{mm}/10^3$ ciclos de carga) y por el PRD aire que define la profundidad proporcional de la rodera para el material sometido a ensayo en N ciclos (%).

Tabla 20. Deformación permanente para comprobar el óptimo de betún

		SMA 16 B 35/50			SMA 16 BM 45/80-65		
Betún	%	5,1	5,6	6,1	5,1	5,6	6,1
Densidad de referencia Marshall	Kg/m^3	2396	2417	2422	2422	2416	2436
Densidad de ensayo		2372	2417	2397	2422	2416	2390
Compactación	%	99	100	99	100	100	98
WTS_{AIRE}	mm	0,10	0,12	0,12	0,06	0,07	0,10
RD_{AIRE}	mm	2,73	3,13	3,21	2,16	2,22	2,63
PRD	%	4,60	5,07	5,18	3,40	3,59	4,31

La sensibilidad de la mezcla bituminosa a la presencia de agua se caracteriza por medio del ensayo de sensibilidad al agua (UNE-EN 12697-12), que determina el efecto de la saturación y de una inmersión acelerada en agua, sobre la resistencia a la tracción indirecta en probetas cilíndricas de mezclas bituminosas. Su valor se expresa en ITSr (Indirect Tensile Strength Ratio), que representa la relación de resistencia a la tracción indirecta, calculada como el cociente entre la resistencia a la tracción indirecta de probetas húmedas (acondicionadas en agua) y la resistencia a la tracción indirecta de probetas secas, expresada como porcentaje (%). Esta resistencia máxima a la tracción de una probeta cilíndrica sometida a carga a la temperatura de ensayo especificada y a la velocidad de desplazamiento de la máquina de ensayo a compresión se determina de acuerdo con la Norma EN 12697-23 “

Tabla 21. Sensibilidad al agua para comprobar el óptimo de betún

Betún	%	SMA 16 B 35/50			SMA 16 BM 45/80-65		
		5,1	5,6	6,1	5,1	5,6	6,1
<i>ITS_{Seco}</i>		1,57	1,58	1,54	1,41	1,41	1,78
<i>ITS_{Humedo}</i>		1,84	1,72	1,60	1,57	1,56	1,90
ITSR	%	85,7	92,1	96,2	89,5	90,6	93,6

5.4.4. Conclusiones

Una vez se han obtenido las características mínimas de contenido de huecos, resistencia a las deformaciones permanentes y sensibilidad al agua, ya estamos en disposición de analizar su respuesta y rechazar aquellas mezclas que no cumplan con alguna de estas características básicas. En la Tabla 22 se muestra de color rojo aquellos resultados que no entran dentro de los límites establecidos para las seis mezclas ensayadas:

Tabla 22. Resumen características mínimas mezclas de estudio

CARACTERÍSTICA	UND.	BETÚN CONVENCIONAL			BETÚN MODIFICADO		
		35/50			45/80-65		
		SMA 16 5,1 BC	SMA 16 5,6 BC	SMA 16 6,1 BC	SMA 16 5,1 BM	SMA 16 5,6 BM	SMA 16 6,1 BM
Densidad máxima	Kg/m ³	2551	2545	2537	2556	2518	2524
Densidad aparente	Kg/m ³	2396	2417	2422	2422	2416	2436
Huecos aire	%	6,1	5,0	4,5	5,2	4,1	3,5
Huecos áridos	%	18,6	18,2	18,9	17,2	17,2	17,9
Huecos rellenos	%	66,1	72,3	76,0	69,6	76,4	80,4
ITSR	%	89,5	90,6	93,6	89,5	90,6	93,6
<i>WTS_{aire}</i>	mm	0,10	0,12	0,12	0,06	0,07	0,10
<i>RD_{aire}</i>	mm	2,73	3,13	3,21	2,16	2,22	2,63
PRD	%	4,55	5,30	5,40	3,40	3,59	4,31

Como era de esperar, la respuesta a las deformaciones permanentes para una mezcla SMA 16 tiene peor comportamiento en el caso de betún convencional que cuando empleamos un betún modificado con polímeros para el mismo contenido de betún. Como podemos ver en los resultados, y teniendo en cuenta los límites determinados en el apartado 5.1.2 “Hipótesis de diseño”, ninguna mezcla realizada con betún convencional para una SMA 16 se encuentra dentro de los requisitos mínimos establecidos. En el caso de utilizar un 5,1% de betún, se tiene una deformación permanente que podría aceptarse al tener un 0,10 mm de WTS aire y un valor de PRD inferior al 5%, pero al poseer un porcentaje de betún bajo, la mezcla tiene un contenido de huecos superior al requerido, lo que acabaría influyendo en las propiedades mecánicas como consecuencia de la permeabilidad de la mezcla. Se toman estas tres características como determinantes al representar la problemática más significativa del firme.

Por tanto, rechazamos la mezcla de SMA 16 con betún convencional al no poseer las características mínimas exigidas y pasamos a determinar las características específicas de la mezcla SMA 16 con betún modificado para poder conocer el porcentaje óptimo de betún para su uso como capa intermedia en el firme.

5.5. CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS DE ESTUDIO

Una vez comprobadas las mezclas que cumplen con las especificaciones mínimas exigidas, se pasa a realizar un análisis de las propiedades mecánicas de las mismas. Esto nos permitirá obtener una caracterización completa del comportamiento de las diferentes mezclas y, por tanto, conocer la que manifiesta mejores prestaciones.

Como se ha indicado en numerosas ocasiones, el estudio pretende comparar las respuestas obtenidas de la novedosa mezcla SMA16 con la más comúnmente empleada AC22 en la capa intermedia del firme. Por tanto, en este apartado se muestra en una misma tabla las características obtenidas tanto para la mezcla AC 22, a la que se le ha realizado los mismos ensayos, como para la SMA 16 de estudio.

Tabla 23. Dosificación de las mezclas AC 22 y SMA 16 de estudio

MEZCLA		AC 22 4,4 BC	SMA 16 5,1 BM	SMA 16 5,6 BM	SMA 16 6,1 BM
Naturaleza del árido		Caliza	Caliza	Caliza	Caliza
Tipo de ligante		B 35/50	PMB 45/80-65	PMB 45/80-65	PMB 45/80-65
Betún/Mezcla	%	4,4	5,1	5,6	6,1
Fibras/Mezcla	%	-	0,48	0,5	0,5
Filler	%	3,4	8,6	8,5	8,3
0/2 caliza	%	38,2	17	18	21
4/10 caliza	%	5,1	55	54	52
4/8 caliza	%	22,6	-	-	-
10/20 caliza	%	14,3	19,4	19,5	18,7
16/32 caliza	%	12,0	-	-	-

Tabla 24. Características mezcla AC 22 y SMA 16 de estudio.

CARACTERÍSTICA	UND.	AC 22	SMA 16 5,1 BM	SMA 16 5,6 BM	SMA 16 6,1 BM
Tipo betún		B 35/50	PMB 45/80-65	PMB 45/80-65	PMB 45/80-65
Contenido betún/mezcla	B/M	2492	5,1	5,6	6,1
Densidad aparente	Kg/m ³	2477	2421	2416	2436
Densidad máxima	Kg/m ³	2595	2555	2518	2524
Huecos aire	%	4,0	5,3	4,1	3,5
Huecos áridos	%	14,6	17,2	17,2	17,9
Huecos rellenos	%	72,8	69,6	76,4	80,4
Estabilidad Marshall	KN	16,1	10,7	10,4	9,7
Deformación Marshall	mm	2,1	2,5	2,5	2,5
ITRS	%	99,7	85,7	92,1	96,2
WTS_{aire}	mm	0,06	0,06	0,07	0,10
RD_{aire}	mm	2,32	2,16	2,22	2,63
PRD	%	3,90	3,40	3,59	4,31

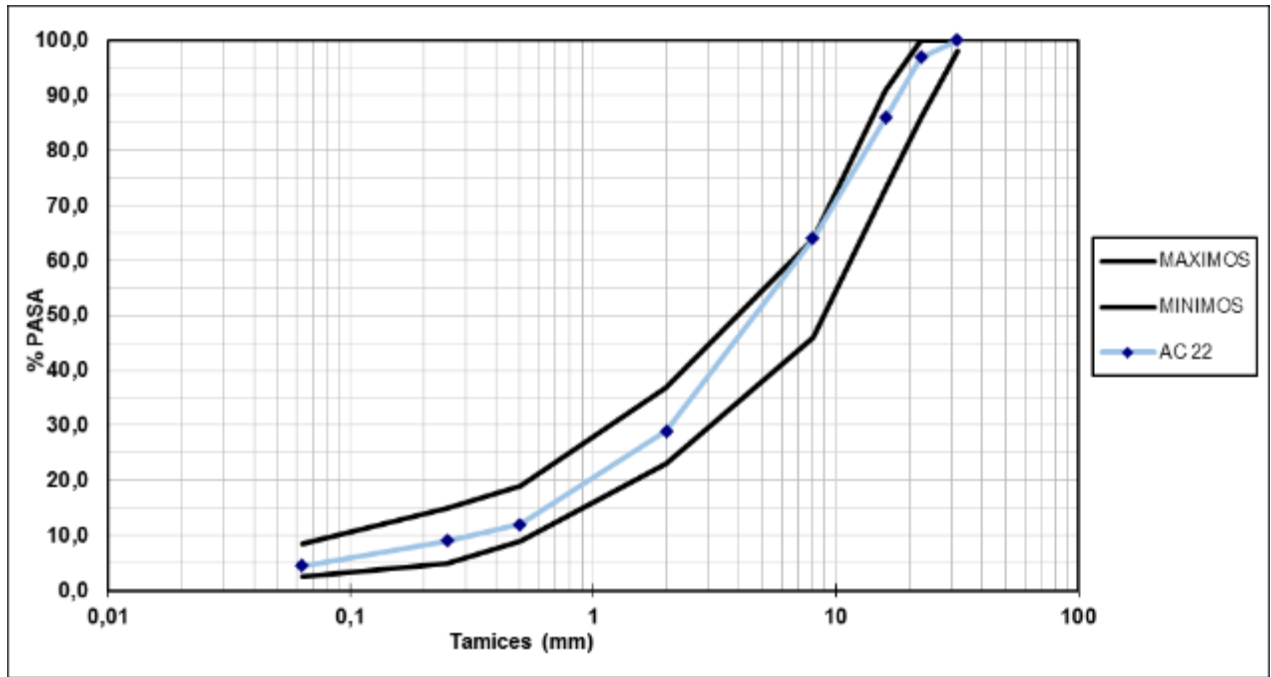


Figura 20. Curva granulométrica. Husos AC22

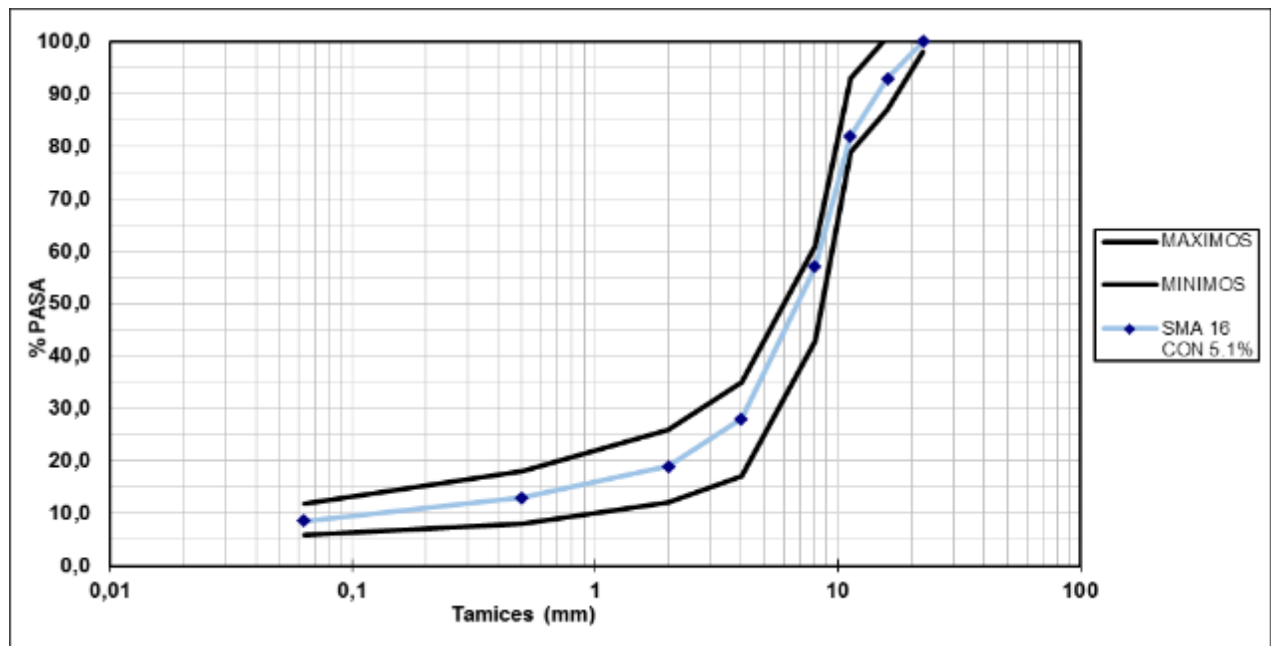


Figura 20. Curva granulométrica. Husos SMA 16

5.6. MÉTODOS DE ENSAYO

Como se ha mencionado anteriormente, las propiedades mecánicas que se quieren evaluar en este estudio, teniendo en cuenta su uso como capa intermedia son:

- **Resistencia a la fatiga de la mezcla:** Para valorar el comportamiento a fatiga se realiza el “Ensayo de Resistencia a la Fatiga” definido por la norma UNE EN 12697-24.
- **Resistencia a la fisuración de la mezcla:** Esta propiedad se evalúa a partir del ensayo definido por la Norma UNE-EN 12697-44 “Propagación de fisuras por el ensayo de flexión con una probeta semicircular”.
- **Capacidad portante del firme:** Se comprobará por medio de los módulos de rigidez obtenidos mediante el ensayo definido por la Norma UNE-EN 12697-22.

Tabla 25. Ensayos realizados durante el estudio

PROPIEDADES	NORMATIVA	DENOMINACIÓN ENSAYO
RESISTENCIA A LA FATIGA	UNE EN 12697-24	- Resistencia a la fatiga
RESISTENCIA A LA FISURACIÓN	UNE EN 12697-44	- Propagación de fisura por el ensayo de flexión con una probeta semicircular
MÓDULO DE RIGIDEZ	UNE EN 12697-26	- Rigidez

En este apartado se definen los ensayos realizados y el procedimiento llevado a cabo en laboratorio durante su ejecución.

5.6.1. Resistencia a la fatiga. Ensayo de flexión en 4 puntos sobre probetas prismáticas

Se denomina como fatiga de una mezcla a la reducción de resistencia de un material

bajo la aplicación repetida de una carga en comparación con la resistencia a la aplicación individual de esa misma carga. En este estudio se evalúa la fatiga de una mezcla a partir del ensayo de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas según rige la norma UNE EN 12697-24.

El ensayo se realiza sobre probetas prismáticas elaboradas a partir del compactador de placa. Las probetas deben ser almacenadas sobre una superficie plana a una temperatura no superior a 20 °C por un periodo entre 14 y 42 días, contados desde el día de su fabricación. En este caso, al ser necesario serrar las probetas en placa, el periodo de almacenamiento se cuenta una vez ha transcurrido el serrado, tomando este día como el de fabricación. El serrado se debe llevar a cabo no más tarde de ocho días tras la compactación del asfalto.

Las probetas se deben dejar secar hasta conseguir masa constante al aire. Posteriormente, se realizan ocho medidas a cada uno de las probetas prismáticas para obtener la densidad aparente de las mismas. La densidad aparente no debe diferir en más del 1% del promedio de la densidad aparente del lote, en caso contrario deberá ser rechazada.

Este método caracteriza el comportamiento de las mezclas bituminosas sometidas a carga de fatiga en un equipo de ensayo de flexión en cuatro puntos, en el que las mordazas interiores y las exteriores están colocadas simétricamente, utilizándose probetas rectangulares esbeltas (probetas prismáticas).

Las probetas prismáticas se someten a cargas periódicas de flexión en cuatro puntos, con rotación y traslación libres en todos los puntos de carga y de reacción a éstas. La flexión se realiza por aplicación de la carga en dos puntos interiores (mordazas interiores), en sentido vertical y perpendicularmente al eje longitudinal de la probeta. A su vez, se fija su posición vertical mediante los soportes de extremo (mordazas exteriores). Esta configuración de carga debe crear un momento constante y, por tanto, una deformación constante entre las dos mordazas interiores. La carga aplicada debe ser sinusoidal.

Los ensayos realizados para llevar a cabo el presente estudio se han realizado con una frecuencia de carga f_0 de 30 Hz.



Figura 21. Probetas serradas y equipo de ensayo a fatiga

Durante el ensayo, se debe medir en función del tiempo la carga necesaria para la flexión de la probeta, la deflexión y el desfase entre estas dos señales. Con estas mediciones se deben determinar las características de fatiga del material sometido a ensayo. El valor que se expresa representa el número de aplicaciones de carga, $N_{f/50}$, realizados cuando el módulo de rigidez complejo S_{mix} disminuye hasta la mitad del valor inicial.

Se deben realizar varios ensayos individuales en una atmósfera ventilada, y con una temperatura controlada, para una frecuencia dada f de aplicaciones de carga sinusoidal.

Sobre la base de que los resultados representan la vida útil $N_{i,j,k}$ para el criterio de fallo j elegido y el conjunto de condiciones de ensayo k , se debe dibujar la línea de fatiga haciendo una regresión lineal entre los logaritmos neperianos de $N_{i,j,k}$ y los logaritmos neperianos de la amplitud de deformación inicial (amplitud de deformación en el ciclo número 100). La forma de la línea de fatiga se expresa según la siguiente fórmula:

$$\ln(N_{i,j,k}) = A_0 + A_1 \times \ln(\varepsilon_i)$$

Donde,

i es el número de la probeta

j representa el criterio de fallo elegido

k representa el conjunto de las condiciones de ensayo

ε_i es la amplitud de la deformación inicial medida en el ciclo de carga número 100.

5.6.2. Propagación de fisuras. Ensayo de flexión con una probeta semicircular o ensayo SCB (Semi-Circular Bending).

El ensayo se realiza a partir de la norma *UNE EN 12697-44*, cuyo objetivo consiste en comprobar la resistencia de una mezcla bituminosa a la propagación de fisuras sometiendo a flexión una probeta semicircular previamente entallada. Este ensayo corresponde a la segunda fase en el mecanismo de rotura de una mezcla bituminosa bajo una carga dinámica, ya que, la primera fase sería la aparición de esta fisura mediante un ensayo de fatiga.

Para su realización son necesarias probetas semicirculares de 50 ± 3 mm de espesor y de 150 ± 1 mm de diámetro mediante un compactador giratorio de acuerdo con la Norma *UNE EN 12697-31*. El equipo de ensayo consiste en dos apoyos circulares distanciados $0,8 D$, que permitan la libre rotación durante la prueba, y un cabezal en la parte central superior que transmita la carga. El equipo se coloca en una prensa capaz de tomar registro tanto de la fuerza aplicada como del desplazamiento realizado. Al tratarse de un ensayo de propagación de fisuras la probeta a ensayar presenta una entalla central.

Previo a la realización del ensayo, se debe comprobar que la probeta cumpla con las dimensiones establecidas. Por ello, se toman las siguientes medidas:

- Diámetro de la probeta, en dos partes a lo largo del borde más largo de la probeta, d_1 y d_2 , indicando el diámetro medio, **D**.
- Altura de la probeta, sobre cada lado, w_1 y w_2 . Se rechaza cualquier probeta en la que $(w_1 - w_2) \geq 0,5$ mm. Se registra la altura media, **W**.
- Espesor de la probeta, en los dos extremos de la base, t_1 t_2 , y en la parte superior (bajo la pletina de carga, t_3). Se rechaza cualquier probeta para la cual el intervalo de espesor entre los tres valores obtenidos sea superior a 0,5 mm, señalando el espesor medio, **T**.

- Profundidad de la entalla realizada, **a**.

Las probetas se almacenan en una cámara climatizada un mínimo de 4 horas. En este estudio, la temperatura de almacenamiento ha sido de 18 ± 1 °C.

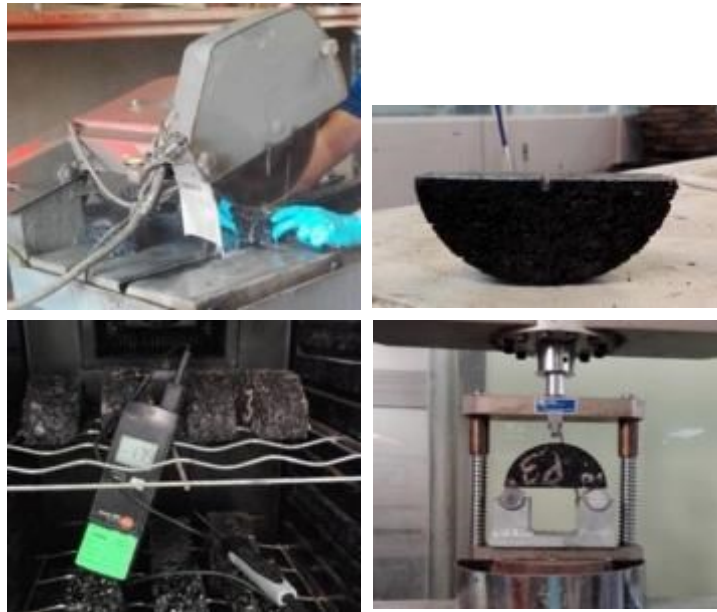


Figura 22. Montaje del ensayo, entalla generada y almacenamiento

El ensayo consiste en someter a una probeta semicircular, con una fisura central, a una flexión en tres puntos, de manera que el centro de la base de la probeta esté sometida a una tensión de tracción. Durante el ensayo, el desplazamiento aumenta a una velocidad constante de 5 mm/min. La carga correspondiente aumenta hasta un valor máximo, $F_{\text{máx}}$, directamente relacionado con la resistencia a rotura de la probeta. Se toma como válido el ensayo si la fisura termina en una zona situada a ± 15 mm del centro de la pletina de carga. Se efectúa el ensayo para como mínimo cuatro probetas con resultados válidos. Se registra la carga aplicada y el desplazamiento del pistón durante todo el proceso.

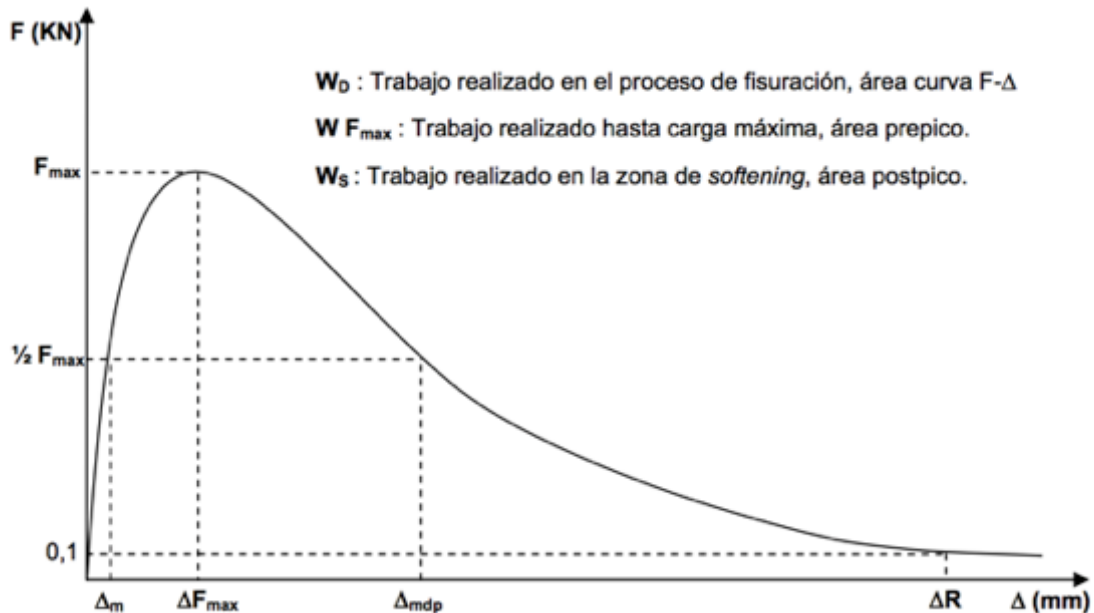


Figura 23. Curva carga-desplazamiento

A partir de estos resultados se pueden obtener una serie de parámetros que determinan las propiedades mecánicas de la mezcla bituminosa, relacionadas con su resistencia al fallo por fisuración:

- Carga máxima a tracción (F_{max}): Se define como la carga máxima registrada en el ensayo de flexión SCB.
- Desplazamiento a carga máxima (ΔF_{max}): Se define como el desplazamiento realizado por el pistón cuando se registra la carga máxima.
- Desplazamiento al 50% F_{max} postpico, (Δmdp): Se define como el desplazamiento registrado por la mezcla una vez que la carga ha caído a la mitad del valor de su carga máxima. Este parámetro indica la capacidad que tiene la mezcla evaluada de admitir deformación, puesto que a medida que las mezclas son más dúctiles, y por ende más deformables, se obtienen mayores valores de Δmdp , mientras que para mezclas más

frágiles se obtienen menores valores de Δmdp .

Los resultados que se obtienen con dicho ensayo serían:

- **Deformación unitaria bajo fuerza máxima, $\epsilon_{max,i}$** , según la ecuación:

$$\epsilon_{max,i} = \frac{\Delta W_i}{W_i} \times 100\%$$

donde,

W_i es la altura de la probeta i , en milímetros (mm)

ΔW_i es el desplazamiento vertical de la probeta i bajo fuerza máxima, en milímetros (mm)

- **Tensión máxima, $\sigma_{max,i}$** , según la ecuación:

$$\sigma_{max,i} = \frac{4,263 F_{max,i}}{D_i \times t_i} \text{ N/mm}^2$$

donde,

D_i es el diámetro de la probeta i , en milímetros (mm)

t_i es el espesor de la probeta i , en milímetros (mm)

$F_{max,i}$ es la fuerza máxima de la probeta i , en newtons (N).

- **Resistencia a rotura, $K_{Ic,i}$** , de la probeta i , según la ecuación:

$$K_{Ic,i} = \sigma_{max,i} \times f \left(\frac{a_i}{W_i} \right) \text{ N/mm}^{3/2}$$

donde,

W_i es la altura de la probeta i , en milímetros (mm)

a_i es la profundidad de la entalla de la probeta i , en milímetros (mm)

$f\left(\frac{a_i}{W_i}\right)$ es el factor geométrico de la probeta i .

El factor geométrico se calcula:

$$f\left(\frac{a_i}{W_i}\right) = 4,782 - (1,219 * (a/W)) + (0,063 * 10^{7,045*(a/W)})$$

*Esta fórmula ha sido realizada de acuerdo al estudio [30].



Figura 24. Ejemplo ensayo SCB para muestra SMA 16

Otro parámetro que relaciona la rigidez de la mezcla y que no se tiene en cuenta en la norma UNE es la energía empleada para la fisuración total de la probeta, energía disipada. Esta energía se corresponde con la integral del área bajo la curva de esfuerzo-deformación, dividido por la superficie de fractura. Cuanto mayor es la energía disipada, G_D , mayor es la resistencia a la fisuración de la mezcla. Este parámetro resulta bastante importante, ya que no tiene en cuenta solo la resistencia máxima de la mezcla si no todo el proceso de rotura del

material tras la carga máxima. El cálculo quedaría:

$$G_D = \frac{\int_0^{df} F(x) \cdot dx}{S} \quad \left(\frac{J}{m^2}\right)$$

Donde,

G_D : Energía disipada, en $\frac{J}{m^2}$

F: fuerza en función de la deformación, en N

x: deformación, en m

S: Superficie de fractura, en m^2

df: deformación final del ensayo, en m

No interesa conocer solo el trabajo realizado en el proceso de fisuración, sino también, el trabajo realizado en la zona de rotura de la probeta, es decir, después de la carga máxima (W_{AR}-postpico). Esto indica que la mezcla es capaz de alcanzar una mayor deformación hasta su rotura, manteniendo parte de su resistencia desde que se inicia el fallo hasta que éste realmente se produce.

5.6.3. Ensayo de Rigidez

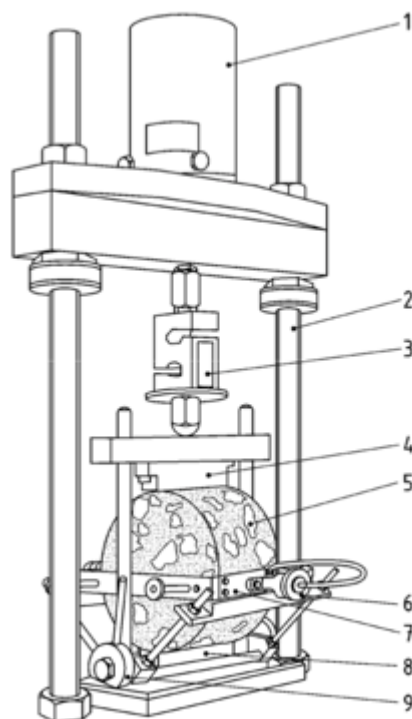
El ensayo de rigidez, según rige la norma UNE EN 12697-26, permite obtener el módulo de rigidez de la mezcla ensayada y, por tanto, la capacidad portante que va a tener en la carretera.

Para realizar este ensayo se preparan probetas tipo Marshall con un espesor comprendido entre 30 y 75 mm. Posteriormente se almacenan en una superficie plana a una temperatura inferior a 25°C durante un periodo comprendido entre 14 y 42 días, contados desde el momento de su fabricación.

El ensayo se realiza para como mínimo 4 probetas, de manera que podamos obtener

un único resultado de módulo de rigidez que comprenda las posibles variaciones en la fabricación de las probetas.

Existen varios métodos para realizar el ensayo de rigidez, en este caso se opta por el ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (IT-CY) indicado en el anexo C de la normativa mencionada. El equipo de ensayo empleado consiste en un bastidor que permite mantener la probeta vertical a la pletina superior e inferior de carga, tal y como muestra la Imagen 26:



Leyenda

- 1 Actuador neumático de carga
- 2 Estructura de carga de acero
- 3 Célula de carga
- 4 Pletina superior de carga
- 5 Probeta
- 6 Ajuste de LVDT
- 7 Bastidor de montaje de LVDT
- 8 Pletina inferior de carga
- 9 Soporte de alineación de LVDT

Figura 25. Equipo de ensayo para ensayo obtener el módulo de rigidez

El sistema permite aplicar impulsos de carga repetidos que se alternan con periodos de descanso a lo largo del diámetro vertical de la probeta, a través de las pletinas de carga. La carga que se aplica tiene forma de una onda de medio seno o parecida.

El periodo ascendente, medido a partir del comienzo del impulso de carga, que es el tiempo necesario para que la carga aplicada aumente de cero hasta el valor máximo, debe ser

(124 ± 4) ms. El valor de la carga se debe ajustar para alcanzar una deformación horizontal transitoria máxima de referencia del 0,005% del diámetro de la probeta.



Figura 26. Equipo de ensayo y probetas para obtención de Módulos de rigidez

La probeta se ensaya dos veces para obtener el módulo de rigidez en dos direcciones, por tanto, una vez ensayada la probeta en la primera posición, se debe extraer del equipo de ensayo y girar (90 ± 10)° alrededor de su eje horizontal. Si el valor medio del módulo de rigidez de este segundo ensayo está comprendido entre el +10% o el -20% del valor medio registrado para el primer ensayo, se aceptan los resultados y el módulo de rigidez de la probeta será el valor medio de los dos ensayos. En caso contrario, los resultados se deben rechazar.

Se debe aplicar, al menos, 10 impulsos de condicionamiento para permitir que el equipo se ajuste a la magnitud de la carga y a su duración, con el fin de obtener la deformación diametral horizontal y el tiempo de carga especificados. Posteriormente, se aplican cinco impulsos de carga adicionales. Para cada aplicación del impulso, se mide y registra la variación de carga aplicada y la deformación diametral horizontal en el tiempo, determinando además el factor de superficie de carga.

El valor que se recoge es el valor medio obtenido de los 5 impulsos de carga finales.

Para cada impulso de carga se debe determinar el módulo de rigidez medio, teniendo en cuenta en el cálculo el valor máximo de la carga vertical aplicada (F), la amplitud de la deformación horizontal obtenida durante el ciclo de carga en milímetros (z), el coeficiente de Poisson y el espesor medio de la probeta, expresado en milímetros (h):

$$E = \frac{F x (v + 0,27)}{(z x h)}$$

El coeficiente de Poisson no se determina, se supone un valor de 0,35 para todas las temperaturas, según la norma.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1. INTRODUCCIÓN

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados, con el fin de poder conocer el comportamiento mecánico de la mezcla de estudio. Como se ha mencionado en apartados anteriores, las mezclas ensayadas corresponden tanto a la mezcla de estudio **SMA 16** como a la mezcla patrón **AC 22** utilizada actualmente como capa intermedia en los firmes. Se busca comparar, por tanto, las respuestas mecánicas de ambas mezclas.

De los ensayos realizados: **resistencia a fatiga, módulo de rigidez y resistencia a fisuración** de la mezcla, se puede obtener resultados de la vida útil de la mezcla para una carga de tráfico dado, la rigidez de la mezcla y la tenacidad de la mezcla.

A partir de estos datos comprobaremos si las características de la mezcla de estudio cumplen con los requisitos mínimos necesarios para servir de capa intermedia e incorpora las características deseadas para frenar la reflexión de fisuras producida en el firme o incluso reduce su aparición.

6.2. ENSAYO DE FLEXIÓN EN 4 PUNTOS SOBRE PROBETAS PRISMÁTICAS

6.2.1. Introducción

Se han ensayado un total de ocho probetas para el ensayo de fatiga en cuatro puntos para cada mezcla. Se debe tener en cuenta que las amplitudes de las microdeformaciones se han ido ajustando progresivamente conforme iba avanzando el estudio de la mezcla, tomando

el primer valor en base a la experiencia del personal de laboratorio. Los datos de las probetas ensayadas se pueden ver en el ANEXO 2. Se debe tener en cuenta que en alguno de los casos no se muestran ocho resultados en la gráfica representada. Esto es debido a que alguna de las probetas ensayadas ha sido rechazada, ya sea por un fallo del ensayo como por el rechazo de la probeta.

6.2.2. Leyes de fatiga

A partir del ensayo se puede elaborar una regresión lineal entre los logaritmos neperianos del número de ciclos hasta alcanzar el 50% del módulo inicial y los logaritmos neperianos de la amplitud de deformación inicial. A la ecuación que define esta regresión lineal se le denomina ley de fatiga. En la Tabla 26 se puede observar la ley de fatiga obtenida para cada mezcla y el valor de la microdeformación para un millón de ciclos ϵ_6 .

Tabla 26. Ley de fatiga y microdeformación para un millón de ciclos de la AC 22 y SMA 16

	Ley de fatiga	ϵ_6 ($\mu\text{m/m}$)
AC 22 35/50	$Y = -4,1564x + 33,846$	124
SMA 16 con 5,1% BM	$Y = -3,782x + 33,006$	160
SMA 16 con 5,6% BM	$Y = -2,9592x + 29,071$	173
SMA 16 con 6,1% BM	$Y = -2,6722x + 27,742$	183

Por tanto, se obtienen valores de resistencia a la fatiga de la mezcla mayores para la SMA 16 que para la mezcla patrón AC 22 BIN 35/50 S. A su vez, esta resistencia mejora con el contenido de betún aplicado como consecuencia de la propiedad elástica que proporciona a la mezcla.

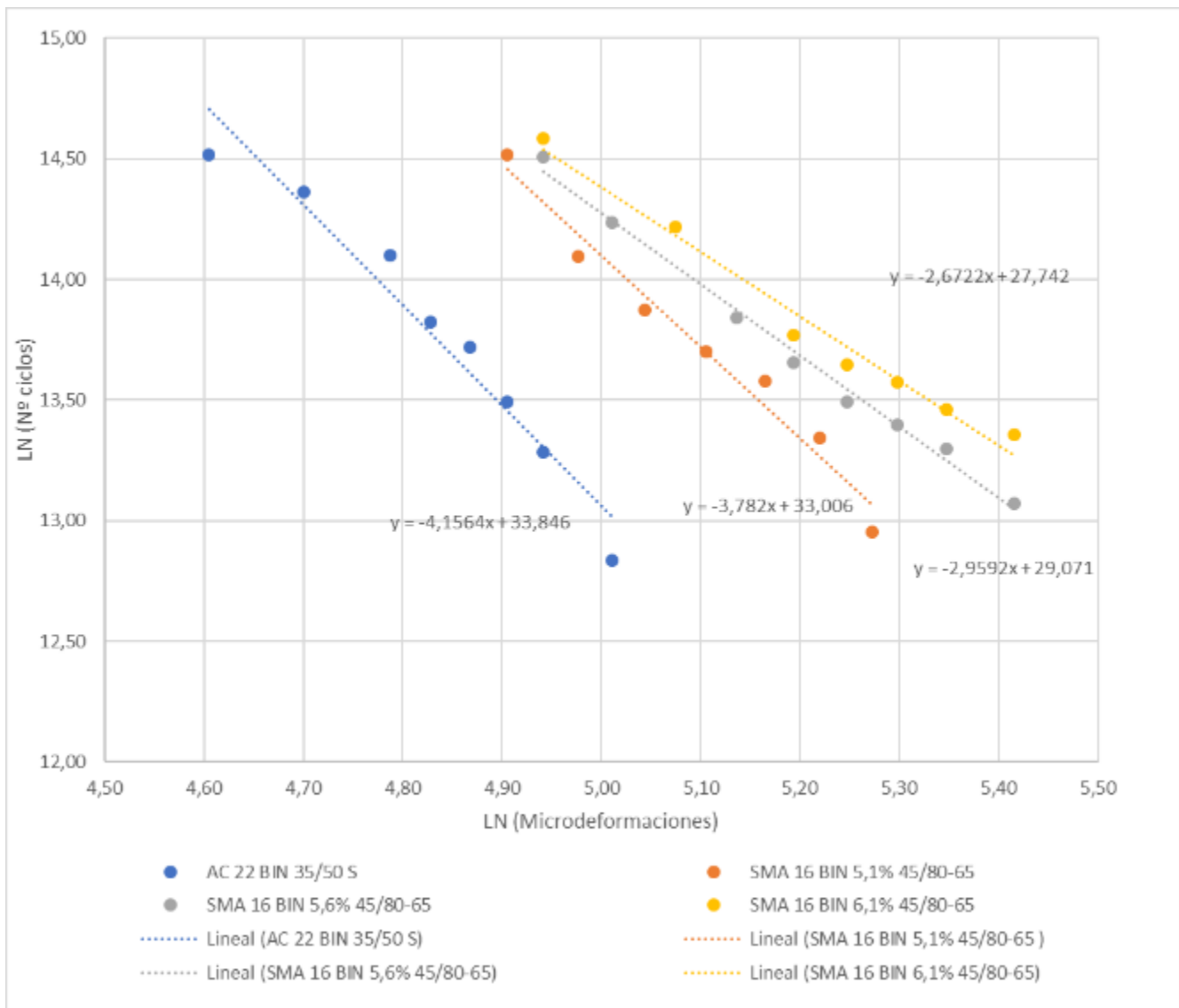


Figura 27. Gráfica comparativa de las leyes de fatiga AC 22 y SMA 16

Como podemos observar en la gráfica de la Figura 27, a medida que aumentamos el contenido de betún en mezcla, la ley de fatiga se atenúa, esto refleja su mejor comportamiento a fatiga, minimizando la deformación del pavimento bajo los efectos repetidos de solicitaciones en el firme inferiores a la rotura.

Dicho comportamiento a fatiga define la durabilidad del firme y el nivel de conservación

requerido en la carretera. Siendo en este caso la SMA 16 con un 6,1% de betún modificado la mezcla que soporta mayor número de ciclos para una misma microdeformación.

6.3. ENSAYO DE FLEXIÓN CON UNA PROBETA SEMICIRCULAR O ENSAYO SCB

6.3.1. Introducción

El diseño de firmes requiere incorporar una nueva propiedad fundamental para analizar la resistencia a la fisuración, con el fin de conocer realmente el desempeño de la mezcla a largo plazo. Otros estudios se centran simplemente en analizar el inicio de la fisura, mediante estudios de tensión-deformación, sin centrarse en el proceso viscoelástico que se produce en la fase de propagación de la fisura. Por ello, interesa conocer en primer lugar la fatiga de la mezcla hasta fisurarse y posteriormente, la propagación de esa fisura ya generada mediante este ensayo.

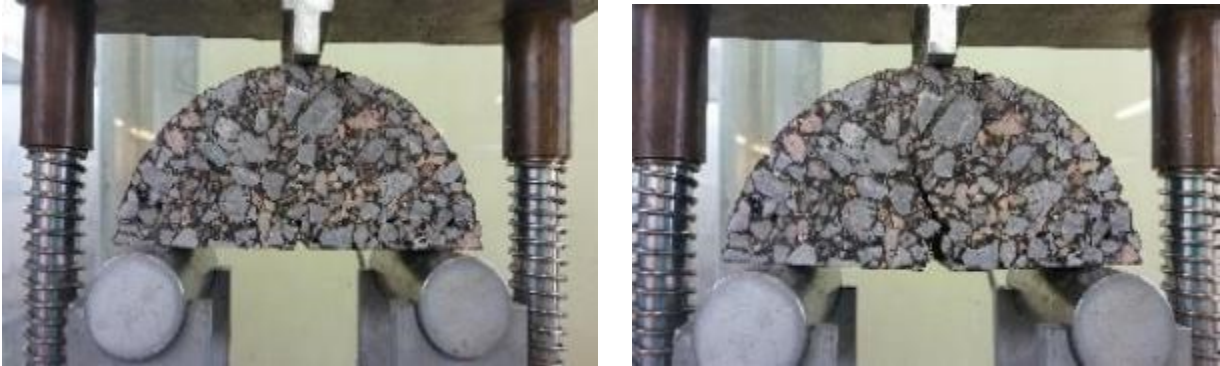


Figura 28. Ensayo SCB

Algunos de los parámetros que nos permiten evaluar la propagación de grietas en el proceso de fractura son la tenacidad a la fractura KI ($N/mm^{3/2}$), que determina la resistencia del material a fracturarse y la energía de fractura GI (J/m^2), que incide el trabajo realizado en el proceso de fisuración. El análisis de la propagación de fisuras se obtiene a partir de la relación fuerza- desplazamiento registrado en el ensayo SCB. Los datos de las probetas ensayadas se pueden ver en el ANEXO 3.

6.3.2. Gráficos Fuerza – Desplazamiento

En la Tabla 27 se puede observar los valores obtenidos de fuerza-desplazamiento durante el ensayo y la correspondiente gráfica en la Figura 29:

Tabla 27. Resultados ensayo SCB para mezcla AC 22 y SMA 16

	Fmax (KN)	ΔF_{max} (mm)	1/2 Fmax (KN)	Δmdp (mm)	ΔR (mm)
AC 22 35/50	6,90	1,26	3,45	1,56	3,23
SMA 16 con 5,1% BM	6,16	1,71	3,08	2,27	4,75
SMA 16 con 5,6% BM	5,59	1,94	2,79	2,77	5,24
SMA 16 con 6,1% BM	4,52	2,50	2,26	4,52	7,94

Como se puede ver en la gráfica de la Figura 29, la mezcla convencional AC 22 es la mezcla que alcanza la mayor fuerza máxima a tracción indirecta, con un valor aproximado de 6,9 KN de media y un desplazamiento medio de 1,3 mm.

Por otro lado, se puede observar como a medida que aumenta el contenido de betún en la mezcla SMA 16, disminuye la fuerza máxima durante el ensayo, mientras que el desplazamiento producido a fuerza máxima aumenta. Estos resultados son coherentes, ya que a mayor componente viscoelástico (ligante), mayor ductilidad tiene la mezcla.

De la misma manera, podemos observar que la mezcla convencional presenta un comportamiento mucho más frágil que la mezcla tipo SMA 16, fenómeno que se observa al disminuir el desplazamiento de rotura ΔR .

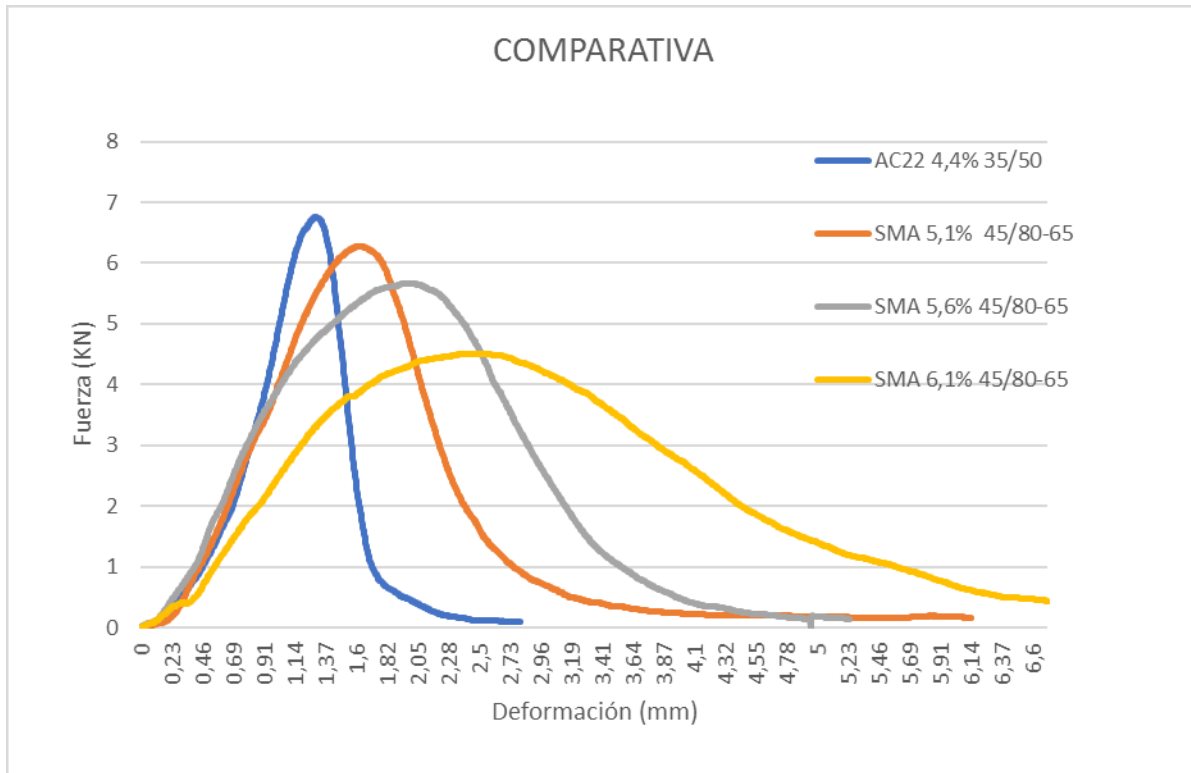


Figura 29. Gráfica comparativa fuerza-desplazamiento para las mezclas de estudio

6.3.3. Resistencia a rotura y energía disipada.

En la Tabla 28 se muestra las características mecánicas calculadas a partir de los datos anteriores y según las ecuaciones indicadas en el apartado 5.6.2. Propagación de fisuras. Se toma como valor de la mezcla al valor medio de las seis probetas ensayadas. A mayor valor de KI ($N/mm^{3/2}$), mayor tenacidad y, por tanto, mayor resistencia tendrá el material a fracturarse.

Por otro lado, se muestra el trabajo realizado en el proceso de propagación de la fisura GI (J/m^2), indicando la energía disipada total empleada en la fisuración de las probetas ensayadas.

Tabla 28. Resistencia a la fisuración y energía disipada en mezcla AC 22 y SMA 16

	ε_{Fmax} (%)	σ_{max} (N/mm ²)	K_i (N/mm ^{3/2})	Relación T/D	TRABAJO (W_i)			ENERGÍA DISIPADA
					W_D	$W_{\Delta Fmax}$	$W_{\Delta R}$	GI
AC 22 35/50	1,7	3,9	22,4	2,27	6,44	3,77	2,68	1896
SMA 16 con 5,1% BM	2,3	3,4	20,3	1,48	9,60	5,07	4,53	2708
SMA 16 con 5,6% BM	2,6	3,0	18,1	1,15	11,08	5,51	5,56	3114
SMA 16 con 6,1% BM	3,4	2,5	15,0	0,74	14,55	6,44	8,11	4226

Según los datos recogidos, se puede observar como la mezcla más tenaz y, por tanto, con mayor resistencia a la fisuración es la mezcla convencional AC 22, propiedad que se va perdiendo conforme aumenta el contenido de betún en mezcla. Sin embargo, la energía disipada durante el proceso de fisuración y propagación es mayor en el caso de la mezcla SMA 16, aumentando junto al contenido de ligante.

6.4. ENSAYO DE RIGIDEZ

6.4.1. Introducción

Para poder analizar la variación existente en el valor de módulo de rigidez para las diferentes mezclas de estudio, se han ensayado cuatro probetas de 101,6 mm de diámetro (Probetas Marshall) en dos direcciones, obteniendo como módulo de rigidez el valor medio de las mismas. El procedimiento llevado a cabo es el descrito en el apartado anterior, según especifica la norma UNE- EN 12697-26. En el ANEXO 4 del documento se muestran los resultados obtenidos para cada una de las probetas ensayadas. Además, se indican los valores de fuerza aplicada y microdeformación generada para los cinco impulsos de carga, representados por medio de una gráfica.

En este apartado se puede ver, como ya se adelantó, que el valor del módulo de rigidez varía en función del porcentaje de ligante presente en la mezcla y que, por tanto, a mayor

cantidad de betún, menor rigidez tendrá la mezcla. Se debe tener en cuenta, a su vez, que el tipo de ligante utilizado para la mezcla patrón es un betún convencional B 35/50 mientras que el utilizado en la SMA 16 es un betún modificado de altas prestaciones PMB 45/80-65.

6.4.2. Módulos

En la Tabla 29 se muestra los valores de módulo obtenido para cada una de las mezclas de ensayo. Se toma como módulo de rigidez al valor medio de las cuatro probetas ensayadas.

Tabla 29. Módulo de rigidez para mezcla AC 22 y SMA 16

	VALOR MEDIO RIGIDEZ (Mpa)
AC 22 35/50	6662
SMA 16 con 5,1% BM	3028
SMA 16 con 5,6% BM	2562
SMA 16 con 6,1% BM	2253

Como se puede observar, el módulo de rigidez de la mezcla SMA 16 es bastante inferior al resultante en una mezcla convencional AC 22. Este dato nos indica que la capacidad portante de la mezcla convencional es mayor. Además, se puede comprobar como a medida que aumenta el contenido de betún, disminuye el valor del módulo de rigidez (Mpa).

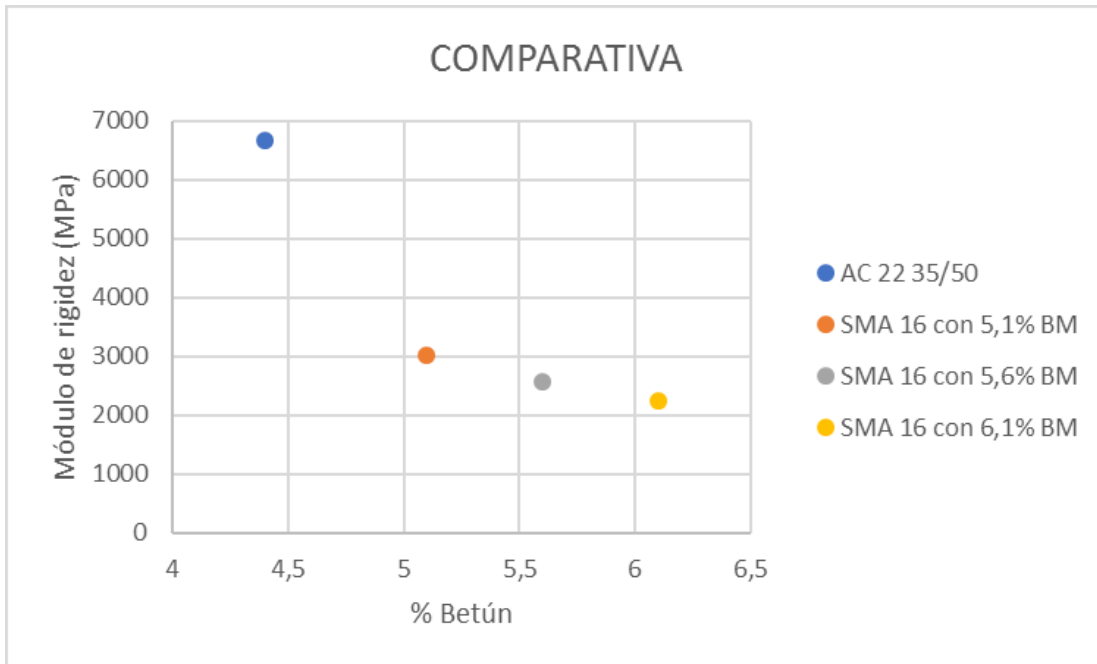


Figura 30. Comparativa del módulo de rigidez para una AC 22 y una SMA 16

CAPÍTULO 7. APLICACIÓN PRÁCTICA

7.1. INTRODUCCIÓN

Con motivo de la reparación y restauración del firme de un tramo de la autovía AP-7 por parte de la empresa PAVASAL, en cuyo proyecto existe un tramo de 400 metros empleando una mezcla SMA 16 como capa intermedia, se propone obtener la fórmula de trabajo óptima para el caso práctico existente a partir de los resultados obtenidos en este estudio.

La zona de extendido consiste en la calzada norte del tramo situado entre el P.K. 468+700 al 468+300 (Eje + Carril lento) de la A.7. Se trata de una sección muy deteriorada, donde se puede observar una alta fisuración e incluso desprendimiento en bloque como consecuencia de la reflexión de fisuras generadas en la losa de hormigón. El tramo más afectado, como es lógico, es el carril derecho.

Para su reparación se procede al saneo de toda la calzada hasta la cota en la que se encuentra la losa de hormigón, a 8 cm de profundidad. En este caso se realiza un tipo de saneo bicapa en el eje y carril derecho con 4 cm de AC 16bin en la capa inferior y 4 cm de SMA 16 con fibras de celulosa en la superior, más 3 cm de SMA 11 como capa intermedia en todo el tramo, tal y como se muestra más adelante.

Mediante el uso de SMA 16 como capa intermedia, se pretende frenar la ascensión de la fisuración producida en las capas inferiores, al emplear una mezcla con mayor resistencia a la fisuración y un mejor comportamiento a fatiga.

El objetivo de este apartado será obtener resultados a largo plazo del comportamiento observado en laboratorio.

7.2. ESTADO ACTUAL

7.2.1. Localización

La zona de estudio se encuentra en un tramo de la autovía A-7, entre los puntos kilométricos 468+700 a 468+300. La autovía del Mediterráneo o A-7 (conocida también por las siglas E-15, según la nomenclatura de la Red de Carreteras Europeas) es una autovía perteneciente a la Red de Carreteras del Estado que se extiende desde Algeciras hasta Barcelona, conectando España con Francia.

El tramo se encuentra en el término municipal de Sagunto (Valencia), unos metros antes del acceso al peaje, tal y como indica la Figura 31:

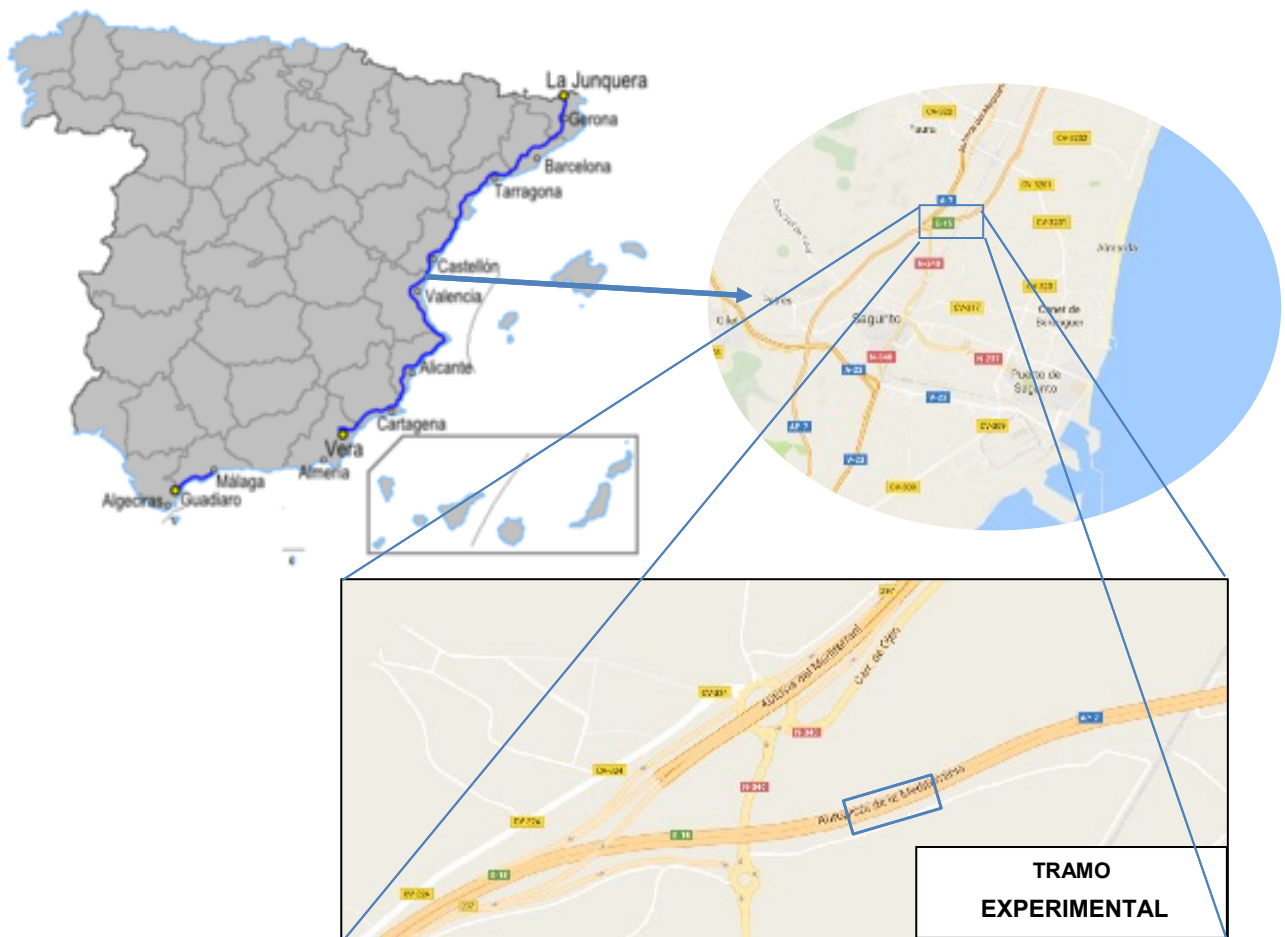


Figura 31. Situación tramo experimental

7.2.2. Geometría

La sección transversal de la Autovía E-15/A-7 es de tres carriles por sentido en la mayor parte del trazado, pero concretamente en la zona de estudio, la calzada cuenta con dos carriles de 3,6 metros de ancho, con arcenes exteriores de entre 2 y 2,5 metros de ancho e interiores de entre 1,5 y 1 metro de ancho. El trazado de la autovía discurre por zona llana con algunos desmontes de carácter suave.



Figura 32. Sección transversal calzada

7.2.3. Tráfico

Según datos publicados en los Mapas de Tráfico 2015 por el Ministerio de Fomento, la IMD (Intensidad Media Diaria) registrada por un aforo permanente situada en una sección próxima al tramo de estudio, es de 17.725 vehículos/día, con una proporción de motos/vehículos ligeros/vehículos pesados de 1/92/7. Por tanto, la tipología de tráfico en el tramo de estudio es un T1 ($800 < IMD_p < 1999$).

7.2.4. Climatología

El Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carretera y Puentes (PG-3), establece para la mayor parte de la Comunidad Valenciana una temperatura estival media, tal y como indica el mapa de la Figura 33:

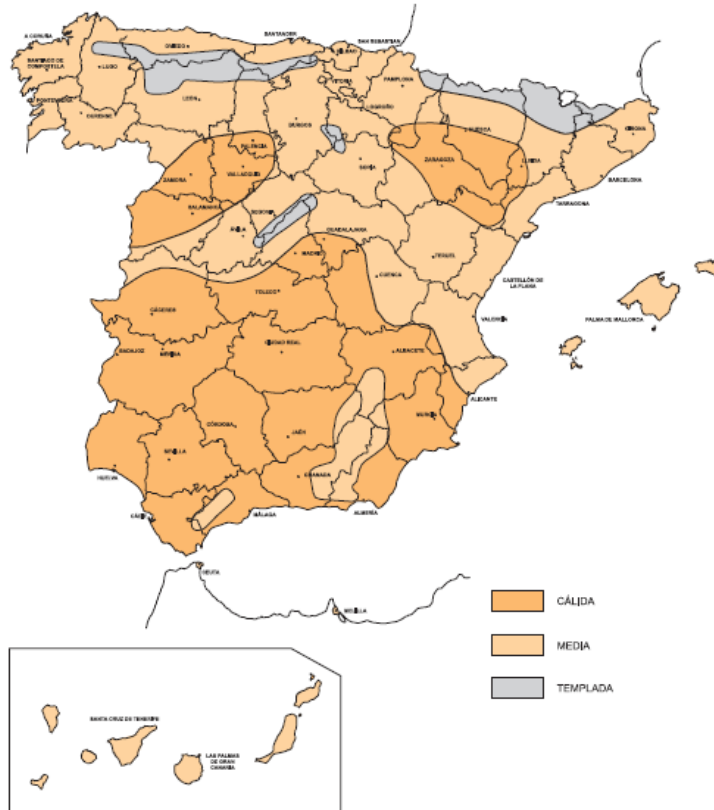


Figura 33. Mapa climatología según PG3

7.2.5. Firme existente

El firme existente en el tramo de estudio consiste en un firme rígido conformado por 2 cm de regularización, geotextil y 6 cm de capa de rodadura, extendido en 2003. Sirviendo de capa inferior una losa de hormigón.

7.3. FORMULA DE TRABAJO

Al tratarse de una reparación del firme conformado por una losa de hormigón como capa base, las capas superiores no requieren de capacidad portante, ya que esta habilidad recae totalmente sobre la losa. Por tanto, las características de diseño requeridas serán las de un firme semirrígido.

Las propiedades de la mezcla en función de la tipología de firme para capa intermedia y con tráfico pesado > 800 vehículos/ día son:

Tabla 30. Factores de diseño según posición de la mezcla y tipo de tráfico. Fuente: Metodología ALEAS [3]

	CAPA INTERMEDIA-TRÁFICO PESADO
PROPIEDADES DE LA MEZCLA	SEMIRRÍGIDO
Módulo de rigidez	2
Adaptabilidad al soporte	0
Resistencia a fatiga	0
Resistencia a deformaciones plásticas	4
Resistencia a la acción de agua	4
Resistencia a esfuerzos tangenciales	0
Resistencia a la desintegración	0
Resistencia a fisuración a bajas temperaturas	1
Resistencia a la fisuración por envejecimiento	0
Resistencia a la fisuración mecánica	1
Resistencia a la fisuración por reflexión	4
Resistencia al escurrimiento	N.A.
Impermeabilidad	2
Drenabilidad superficial	0
Trabajabilidad	2

- La numeración asignada en la tabla anterior corresponde a la valoración de la relevancia de cada una de las propiedades descritas, siendo: 4-fundamental; 3-importante; 2-a considerar; 1-marginal; 0-indiferente.

Como se indica en la Tabla 30, al tratarse de un firme semirrígido, las propiedades

fundamentales que debe cumplir la mezcla son: resistencia a deformaciones plásticas, resistencia a la acción del agua y resistencia a la fisuración por reflexión, siendo complementarias el módulo de rigidez, la impermeabilidad y la trabajabilidad de la mezcla. La resistencia a la fatiga, por tanto, no tiene ninguna relevancia en el caso de estudio.

Los resultados obtenidos hasta el momento con respecto a estas propiedades han sido:

Tabla 31. Comparativa resultados AC 22 y SMA 16 de estudio

	UND.	AC 22 35/50	SMA 16 5,1% 45/80-65	SMA 16 5,6% 45/80-65	SMA 16 6,1% 45/80-65
Resistencia a deformaciones plásticas WTS	mm	0,06	0,06	0,07	0,10
Resistencia a la acción del agua ITSR	%	99,7	85,7	92,1	96,2
Resistencia a la fisuración por reflexión					
• Resistencia a la rotura K	$N/mm^{3/2}$	22,4	20,3	18,1	15,0
• Resistencia a la propagación de la fisura GI	J/m^2	1896	2708	3114	4226
Módulo de rigidez	Mpa	6662	3028	2562	2253
Huecos aire	%	4,0	5,3	4,1	3,5
Huecos rellenos	%	72,8	69,6	76,4	80,4

En este caso en particular, con una losa de hormigón ejerciendo de capa base y con las correspondientes fisuras ya existentes, nos interesa sobre todo una mezcla que presente una buena capacidad a la reflexión de fisuras. Pero por otro lado, un mejor comportamiento a la reflexión de fisuras equivale a una mezcla con mayor contenido de ligante y por tanto con menor resistencia a las deformaciones plásticas. Este es el caso de la mezcla SMA 16 con un 6,1% de betún modificado, ya que con esta mezcla se obtendría una mayor flexibilidad del firme, pero con valores de WTS muy limitantes.

Por tanto, se podrían emplear tanto la SMA 16 con 5,1% de betún modificado como esta

misma mezcla con un 5,6% de betún modificado ya que ambas cumplirían con todas las especificaciones mínimas. Pero, con menor proporción de betún, obtenemos mayor contenido de huecos aire y esto supone un mejor acceso al agua y al aire, lo que acelera el proceso de envejecimiento propio del material y por tanto, de la vida útil de la vía.

Con los resultados obtenidos, concluiríamos que la mezcla óptima para su uso en la zona de estudio equivaldría a una mezcla SMA 16 con un 5,6% de betún modificado. Con su uso se pretende mejorar la durabilidad del firme y reducir la conservación del mismo.

La fórmula de trabajo de la SMA 16 utilizada en el tramo de estudio corresponde a la recogida en el estudio de investigación con un porcentaje de betún modificado PMB 45/80-65 de 5,6%, cuya dosificación resulta:

Tabla 32. Fórmula de trabajo para la aplicación de la SMA 16

		SMA 16 BM 45/80-65
Betún	%	5,6
Filler	%	6,5
Fracción 0/2	%	16,8
Fracción 4/10	%	53,1
Fracción 10/20	%	18,0
Fibras/ mezcla	%	0,3

7.4. ACTUACIÓN Y SECCIONES

Las actuaciones realizadas para la reposición del firme han sido:

- Fresado general del firme hasta una profundidad de 8 cm
- Carril derecho y eje: Reposición de la capa intermedia con 4 cm de AC 16 BIN y 4 cm de SMA 16

- Reposición de la capa de rodadura con 3 cm de SMA 11
- Pintado de marcas viales

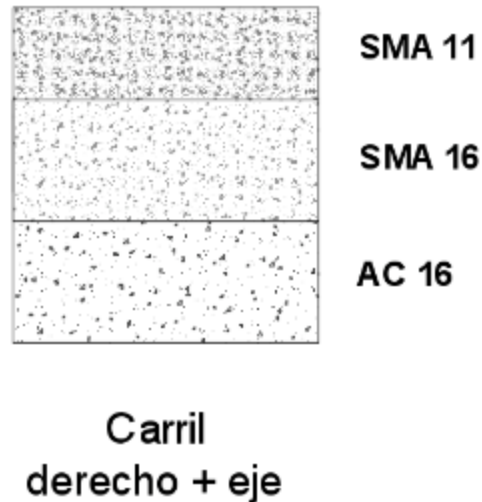


Figura 34. Sección de la reposición del firme A-7 desde P.K 468+700 a P.K. 468+300

7.5. RESULTADOS

Tras el extendido y compactación de la capa intermedia del firme, se recogieron tres testigos para comprobar sus características mediante ensayos en laboratorio, los resultados obtenidos fueron:

Tabla 33. Resultados obtenidos de los testigos extraídos en la zona de estudio

UNE-EN 12697:2 GRANULOMETRÍA		UNE 12697:1: DOSIFICACIÓN DE LIGANTE					
TAMICES mm	% PASA	% LIGANTE SOBRE ÁRIDO	5,86				
22,4	100	% LIGANTE SOBRE MEZCLA	5,51				
16	93	UNE 12697:6: DENSIDAD APARENTE					
11,2	80	DENSIDAD APARENTE g/cm ³	2,416				
8	56	% HUECOS MEZCLA	4,1				
4	28	CONTENIDO EN FIBRAS					
2	21	RELACIÓN FILLER/BETUN					
0,5	13	1,5					
0,25	11	NLT 314: EXTRACCIÓN DE TESTIGOS					
0,125	10	PK	LOCALIZACIÓN	ESPESOR (mm)	DENSIDAD (g/cm ³)	% COMPACTACIÓN	% HUECOS
0,063	8,5	468+750	LADO MAR	41,3	2,384	98,7	5,3
		468+700	LADO MAR	40,5	2,400	99,3	4,7
		468+600	LADO MAR	40,2	2,406	99,6	4,4

7.6. VALORACIÓN ECONÓMICA

MEDICIONES

Tabla 34. Mediciones. Aplicación práctica

UNIDAD	UNID.	PROF.	LONG.	ANCHO	MEDICIÓN TOTAL
CAPÍTULO 1: SANEOS					
m2cm Fresado de mezcla bituminosa en reparaciones puntuales y transporte a vertedero autorizado, incluso canon de vertido.					
468+700 a 468+300 EJE+CL	1,0	8,0	400,0	4,2	13.440
TOTAL					13.440
m2 Limpieza, eliminación de resaltos, barrido y aspirado de calzada					
468+700 a 468+300 EJE+CL	1,0	-	400,0	4,2	1.680
TOTAL					1.680
CAPÍTULO 2: PAVIMENTACIÓN					
t Emulsión Termoadherente C60B4 Ter o C60B3 Ter en riego de adherencia para capas base e intermedias.					
468+700 a 468+300 EJE+CL	0,01	0,035	400,0	4,2	0,588
TOTAL					0,588
t Mezcla bituminosa en caliente AC16Surf o AC16bin para capas de saneo, con áridos porfídicos, extendida y compactada, incluso transporte y manipulaciones de filler. Sin incluir el suministro de betún y filler.					

468+700 a 468+300 EJE+CL	2,450	0,04	400,0	4,2	164,64
TOTAL					164,64

t Mezcla bituminosa en caliente en saneos tipo SMA 16 con fibras, con betún modificado tipo PMB 45/80-65 al 5,6%. Fibras de celulosa al 0,3% y árido grueso porfídico, extendida y compactada, incluso transporte y manipulaciones de filler, betún y fibras. Sin incluir el suministro de betún, fibras y filler.

468+700 a 468+300 EJE+CL	2,400	0,04	400,0	4,2	161,280
TOTAL					161,280

t Emulsión Termoadherente Modificada C60BP4 Ter o C60BP3 Ter en riego de adherencia para capa de rodadura

468+700 a 468+300 EJE+CL	0,01	0,05	400,0	4,2	0,84
TOTAL					0,84

Mezcla bituminosa en caliente SMA11, en capa de rodadura, con betún modificado tipo PMB fibras de celulosa al 0,3%, árido porfídico, extendida y compactada, incluido transporte y manipulación de betún, filler y fibras. Sin incluir el suministro de betún, filler y fibras.

468+700 a 468+300 EJE+CL	2,40	0,03	400,0	4,2	120,96
TOTAL					120,96

t Betún tipo B35/50

AC 16	0,05	164,64			8,232
TOTAL					8,232

t Betún modificado 45/80-65 de altas prestaciones

SMA 16	0,06	161,28			9,677
--------	------	--------	--	--	-------

SMA 11	0,06	120,96		7,257
TOTAL				16,935

t Polvo mineral de aportación

AC 16	0,05	164,64		8,232
SMA 16	0,05	161,28		8,064
SMA 11	0,05	120,96		6,048
TOTAL				22,344

t Suministro fibras de celulosa

SMA 16	1,0	161,28	0,003	0,483
SMA 11	1,0	120,96	0,003	0,363
TOTAL				0,846

CAPÍTULO 3: SEÑALIZACIÓN

m Calzada de dos carriles señalizada horizontalmente con pintura acrílica autorreticulable en base agua, de acuerdo a la norma 8.2-IC, incluye flechas, símbolos y cebreados, todos ellos con áridos antideslizantes y galones y hectómetros en el arcén

468+700 a 468+300 EJE+CL	1,0	-	400,0	-	400,0
TOTAL					400,0

m Marca vial de tipo II (RR), de pintura blanca reflectante, acrílica en base acuosa, continua con resaltes tipo struder termoplásticos de 20cm de ancho, incluso preparación de la superficie, premarcaje y señalización de obras, totalmente terminada (medida de longitud realmente pintada)

468+700 a 468+300 EJE+CL	2,0	-	400,0	-	800,0
TOTAL					800,0

Ud. Suministro y colocación de captafaros tipo loseta a dos caras, en el firme

468+700 a 468+300 EJE+CL	0,10	-	400,0	-	40,0
TOTAL					40,0

PRESUPUESTO

Tabla 35. Presupuesto. Aplicación práctica

UNIDAD	MEDICIÓN TOTAL	PRECIO UNITARIO € (*)	TOTAL €
CAPÍTULO 1: SANEOS			
m2cm Fresado de mezcla bituminosa en reparaciones puntuales y transporte a vertedero autorizado, incluso canon de vertido.	13.440	0,51	6.854,4
m2 Limpieza, eliminación de resaltos, barrido y aspirado de calzada	1.680	1,87	3.141,6
TOTAL CAPÍTULO 1: SANEOS			9.996,0
CAPÍTULO 2: PAVIMENTACIÓN			
t Emulsión Termoadherente C60B4 Ter o C60B3 Ter en riego de adherencia para capas base e intermedias.	0,588	291,50	171,402
t Mezcla bituminosa en caliente AC16Surf o AC16bin para capas de saneo, con áridos porfídicos, extendida y compactada, incluso transporte y manipulaciones de filler. Sin incluir el suministro de betún y filler.	164,64	26,50	4.362,96
t Mezcla bituminosa en caliente en saneos tipo SMA 16 con fibras, con betún modificado tipo PMB 45/80-65 al 5,6%. Fibras de celulosa al 0,3% y árido grueso porfídico, extendida y compactada, incluso transporte y manipulaciones de filler, betún y fibras. Sin incluir el suministro de betún, fibras y filler.	161,280	34,71(**)	5.598,83
t Emulsión Termoadherente Modificada C60BP4 Ter o C60BP3 Ter en riego de adherencia para capa de rodadura	0,84	348,31	292,58

Mezcla bituminosa en caliente SMA11, en capa de rodadura, con betún modificado tipo PMB fibras de celulosa al 0,3%, árido porfídico, extendida y compactada, incluido transporte y manipulación de betún, filler y fibras. Sin incluir el suministro de betún, filler y fibras.	120,96	33,92 (**)	4.102,96
t Betún tipo B35/50	8,232	440,0	3.622,08
t Betún modificado 45/80-65 de altas prestaciones	16,935	540,0	9.144,90
t Polvo mineral de aportación	22.344	71,18	1.590,44
t Suministro fibras de celulosa	0,846	1.100,0	930,60
TOTAL CAPÍTULO 2: PAVIMENTACIÓN			29.816,75
CAPÍTULO 3: SEÑALIZACIÓN			
m Calzada de dos carriles señalizada horizontalmente con pintura acrílica autorreticulable en base agua, de acuerdo a la norma 8.2-IC, incluye flechas, símbolos y cebreados, todos ellos con áridos antideslizantes y galones y hectómetros en el arcén	400,0	0,31	124,00
m Marca vial de tipo II (RR), de pintura blanca reflectante, acrílica en base acuosa, continua con resaltes tipo struder termoplásticos de 20cm de ancho, incluso preparación de la superficie, premarcaje y señalización de obras, totalmente terminada (medida de longitud realmente pintada)	800,0	0,53	424,00
Ud. Suministro y colocación de captafaros tipo loseta a dos caras, en el firme	40,0	6,22	248,80

TOTAL CAPÍTULO 3: SEÑALIZACIÓN	796,80
---------------------------------------	---------------

RESUMEN PRESUPUESTO

TOTAL CAPÍTULO 1: SANEOS	9.996,0
---------------------------------	---------

TOTAL CAPÍTULO 2: PAVIMENTACIÓN	29.816,75
--	-----------

TOTAL CAPÍTULO 3: SEÑALIZACIÓN	796,80
---------------------------------------	--------

TOTAL REPARACIÓN PK. 468+700 A PK. 468+300	40.609,55
---	------------------

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (P.E.M)	40.609,55
--	-----------

13% GASTOS GENERALES (G.G.)	5.279,24
------------------------------------	----------

6% BENEFICIO INDUSTRIAL (B.I.)	2.436,57
---------------------------------------	----------

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN PARA CONTRATO (P.E.C.)	48.325,36
--	------------------

(*) Los precios unitarios indicados son los establecidos en la base de precios de referencia del Ministerio de Fomento para la ejecución de obras públicas.[32]

(**) Al no existir un valor de referencia, se indica un valor aproximado del mismo.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y POSIBLES LINEAS DE INVESTIGACIÓN

En este apartado se muestran las conclusiones obtenidas durante todo el proceso de realización de este estudio y tras el análisis de los resultados.

El objetivo del estudio consistía en evaluar el comportamiento de la novedosa SMA 16 para poder conocer si ésta podría reducir o incluso evitar la problemática existente en las vías por fisuración del firme empleándola como capa intermedia. Se pretendía evaluar en laboratorio todas aquellas propiedades que afectan al deterioro del firme y más en particular a la reflexión de fisuras. Por ello, se realizaron estudios sobre: resistencia a deformaciones permanentes, resistencia a la fisuración, resistencia a la acción del agua, resistencia a la fatiga de la mezcla, contenido de huecos y capacidad portante. Con el fin de evitar las posibles variaciones existentes en todo trabajo experimental, se evaluaron los resultados por medio de una comparativa con las propiedades correspondientes a la mezcla que habitualmente se está empleando como capa intermedia en el firme, AC 22 BIN 35/50 S. Además, se realizó el estudio para dos tipos de betún distintos, uno convencional 35/50 y otro modificado con polímeros 45/80-65 y para distintos contenidos de ligante, tratando de encontrar el contenido de betún óptimo que presente las mejores características para cada caso particular.

Entre las conclusiones destacamos que, las mezclas SMA deben ser tratadas con betunes modificados con polímeros que mejoren su respuesta a las altas exigencias, proporcionando una mayor cohesión y tenacidad a la mezcla y por tanto una mayor resistencia a la fatiga y a las deformaciones plásticas.

Durante el ensayo se comprobó la mejor respuesta de la mezcla SMA 16 BIN 45/80-65

ante la resistencia a la fatiga de la mezcla y la propagación de las fisuras, si bien es cierto, la mezcla convencional AC 22 BIN 35/50 presenta mejor comportamiento a capacidad portante y resistencia a deformaciones permanentes. Estos resultados son lógicos, ya que la flexibilidad de la mezcla depende del contenido de elemento viscoelástico, como es el ligante y la capacidad resistente del esqueleto mineral presente en la mezcla.

Se podría concluir que la mezcla bituminosa SMA 16 mejora la durabilidad de la mezcla y por tanto la vida útil de la misma, reduciendo las labores de conservación necesarias en toda vía existente. Su aplicación resulta aún más conveniente en aquellos casos en los que existe una losa de hormigón ejerciendo de capa base, ya que al tratarse de un firme rígido, la función resistente de las solicitaciones presentes en la vía recaen en la losa de hormigón, buscando propiedades dúctiles para la capa intermedia que sean capaces de resistir la reflexión de fisuras impuestas en la losa de hormigón.

El contenido de betún óptimo dependerá del conjunto del firme existente o de diseño, ya que, en aquellos casos en los que la capa intermedia requiere de cierta capacidad portante y no tanto de flexibilidad, se recomienda reducir el contenido de betún (aunque no inferior al 5% de B/M) mientras que si se buscan características flexibles, el contenido óptimo se encontrará más próximo al 6% de B/M. Este estudio de optimización del betún deberá venir respaldado con un estudio económico que compare el coste adicional existente por el tipo y cantidad de betún empleado en comparación con el aumento de la vida útil del firme y la reducción en las labores de conservación.

Estas conclusiones teóricas deberán ser defendidas por el comportamiento a escala real obtenido del tramo de aplicación. Por ello, se considera imprescindible y así está contemplado en este estudio de investigación, la obtención de resultados a largo plazo del comportamiento resultante. Su aplicación ha permitido medir y verificar tanto la correcta formulación y diseño desarrollados en el laboratorio, como la fabricación y puesta en obra de estas mezclas, permitiendo además, evaluar su comportamiento durante su vida útil (análisis que se excede del alcance de este estudio).

Por tanto, las características que se persiguieron inicialmente con el diseño de las SMA se corroboran con los ensayos realizados sobre las mezclas estudiadas.

A partir de este estudio de investigación, se pretende aumentar el conocimiento existente en torno a las características intrínsecas de este tipo de mezclas bituminosas tan poco utilizadas en España, buscando que sirva de base para la integración de las mezclas tipo SMA a la normativa española y así poder optar a un mayor abanico de posibilidades en el diseño de firmes que se adapten a las distintas problemáticas existentes en el firme.

Por último, se detallan una serie de estudios que convendría realizar para corroborar los resultados aquí obtenidos y aumentar el conocimiento sobre el comportamiento de las mezclas bituminosas tipo SMA 16:

- Obtención del comportamiento a largo plazo del tramo experimental durante su vida útil.
- Estudio económico que compare el coste adicional correspondiente a la mezcla SMA 16 con la vida útil de la vía.
- Estudio del comportamiento de las SMA 16 con distintos tipos de betunes modificados con polímeros.
- Estudio del comportamiento de una AC 22 empleando betunes modificados

CAPÍTULO 9. CONCLUSIÓN

Una vez realizado el presente Estudio enmarcado como Trabajo Fin de Máster, considerando que se han cumplido los objetivos establecidos y tras su revisión por parte del tutor y de los cotutores del mismo, se presenta a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universitat Politècnica de València y se eleva a su calificación por el Tribunal correspondiente al Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, a la espera de su defensa pública el día fijado a dichos efectos.

Valencia, a 04 de julio de 2017

Nora Esteban Sanzol

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MINISTERIO DE FOMENTO (ORDEN FOM 3460/2003). “Instrucción de carreteras. Secciones de firme”. Norma 6.1.I.C.
2. BOE (enero 2015). “Artículo 542. Mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes.
3. ALEAS (2017). “Metodología de diseño de mezclas bituminosas”. Agrupación de Laboratorios de Entidades Asociadas a ASEFMA.
4. GENERALITAT VALENCIANA. DIRECCIÓ GENERAL D’OBRES PÚBLIQUES (2009). “Norma de Secciones de Firme” de la Comunitat Valenciana”.
5. ORDEN CIRCULAR 10/2002. “Secciones de firme y Capas estructurales de firmes”.
6. AENOR. UNE-EN 12697 “Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente”. Asociación Española de Normalización y Certificación.
7. AENOR. UNE-EN 13108-Parte 1 “Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 1: Hormigón asfáltico” Asociación Española de Normalización y Certificación.
8. AENOR. UNE-EN 13108-Parte 5 “Mezclas bituminosas. Especificaciones de materiales. Parte 5: Mezclas bituminosas tipo SMA” Asociación Española de Normalización y Certificación.
9. BAÑON BLÁZQUEZ L. (2002) “Manual de carreteras.” Capítulo 19. Firmes. Capítulo 24. Cálculo de firmes. Capítulo 25. Patología de firmes.
10. CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMÉRICA (2002). “Catálogo de deterioros de pavimentos flexibles”.
11. MORENO NAVARRO F.M. (2013). “Diseño de un método de ensayo de laboratorio para el análisis de la resistencia a fisuración de mezclas bituminosas”. Tesis doctoral. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Granada.

12. ASI (2006). "Laboratory comparison study for the use of Stone Mastic Asphalt in hot wather climates"
13. MOGHADAS NEJAD (2010). "Fatigue behavior of SMA and HMA mixtures"
14. SEGUL ET. AL (2013). "Evaluation of SBS modified stone mastic asphalt pavement performance"
15. QUI Y.F. (2006). "Desingn and Performance of Stone Mastic Asphalt".
16. BROWN E.R. (1993). "Evaluation of laboratory properties of SMA mixtures"
17. CEMEX UK. Innovative asphalt solutions. <<http://www.cemex.co.uk/viabase.aspx>>
18. ASEFMA (2012). Comunicación 33. "Diseño de mezclas SMA, como capa de rodadura e intermedia, para su empleo en España"
19. ASEFMA (2012). Comunicación 34. "Tramo de ensayo a escala real con mezclas bituminosas en caliente de la familia SMA (Norma UNE EN 13108-5)"
20. ASEFMA (2013). Comunicación 12. "Mezclas SMA (Stone Mastic Asphalt) con alto contenido de ligante"
21. PROPUESTA DE PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS TIPO SMA <www.proyectossma.eu>
22. GALLART VILLAMOR F. (octubre 2011). "Evaluación en laboratorio de la durabilidad de mezclas bituminosas tipo SMA". Proyecto final de carrera. Universidad Politécnica de Cataluña.
23. GRILLO S. (junio 2012). "Metodología para el diseño y la caracterización de mezclas bituminosas tipo SMA". Universidad Politécnica de Cataluña.
24. EAPA (2007). "Long-life Asphalt Pavements" Technical versión. European Asphalt Pavement Association.
25. BOTELLA R. Y PÉREZ F. "Resistencia a la fisuración de las mezclas SMA". Revista Asfalto y pavimentación.
26. NSENGIYUMVA G. (Abril 2015). "Development of Semi-Circular Bending (SCB) Fracture Test for Bituminous Mixtures. University of Nebraska-Lincoln.
27. BACH ELIZABETH V. (2009). "Comportamiento mecánico de las mezclas tipo SMA (Stone Mastic Asphalt). Universidad Ricardo Oalma de Lima-Perú.
28. PAREDES L.A., REYES O.J. Y CAMACHO J.F. (mayo 2013). "Comportamiento de mezclas asfálticas densas a partir del ensayo de viga semicircular simplemente

apoyada”. Universidad Militar Nueva Granada-Bogotá.

29. NAPA. “Designing and Constructing SMA Mixtures-State of the Practice”. Federal Highway Administration.

30. GOURAB, S. y PRAPOORNA, K. (diciembre 2015). “Fracture properties of asphalt mixtures using semi-circular vending test: A state-of-the-art review and future research”. Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Kharagpur, India.

31. MINISTERIO DE FOMENTO. “Mapas de Tráfico 2015”. Dirección General de Carreteras.

32. ORDEN CIRCULAR 37/2016 (enero 2016). “Base de precios de referencia de la Dirección General de Carreteras). Ministerio de Fomento

ANEXO 1. ENSAYOS EN LABORATORIO

1. PREPARACIÓN DE LOS ÁRIDOS.

En primer lugar, se preparan los áridos que van a formar parte de la mezcla. Los ensayos que se realizan para caracterizar los áridos se muestran a continuación.

- **Análisis granulométrico según la norma UNE EN 933-1 “Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado”**

Al ser árido procedente de cantera ya va clasificado en tolvas de fracciones: 0/2, 4/10, 10/20 y 16/32. Para estas cuatro fracciones se debe obtener el porcentaje que pasa por cada uno de los tamices intermedios, así como el porcentaje de cabeza y cola presente, para posteriormente poder ajustar la curva granulométrica de la mezcla según el material del que disponemos. Para el tamizado se utilizan los tamices normalizados con marcado CE.

Se debe tener en cuenta que en el caso de la arena, se debe limpiar y pasar por el tamiz 0,063 para retirar el filler que pueda estar presente.



Figura 35. Tamizado de los áridos.

➤ **Ensayo desgaste de los Ángeles según norma UNE-EN 1097-2 “ Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación”**

Se determina la resistencia a la fragmentación del árido grueso por medio de un ensayo que consiste en voltear una muestra de árido en el interior de un tambor giratorio, junto con bolas de acero. La muestra deberá ser de al menos 15 kg, con una granulometría comprendida entre 10 y 14 mm. Tras el volteo se determina el material retenido por el tamiz de 1,6 mm. El coeficiente de Los Ángeles, LA, se determina a partir de la siguiente expresión:

$$LA = \frac{5000 - m}{50}$$

Donde,

m es la masa retenida por el tamiz de 1,6 mm, expresada en gramos.

➤ **Densidad de las partículas según la norma UNE-EN 1097-6 “Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua”**

La densidad de las partículas se calcula a partir de la relación entre la masa y el volumen. La masa se determina pesando la muestra de ensayo en condiciones de saturación, y pesándola de nuevo tras su secado en estufa. El volumen se determina a partir de la masa de agua desplazada, ya sea por la reducción de masa en el método de la balanza hidrostática, o por pesadas según el método del picnómetro.

Este ensayo se realiza para fracciones de 0,063 mm a 4 mm, de 4mm a 31,5 mm y de 31,5mm a 63 mm.

➤ **Índice de lajas según la norma UNE EN 933-3 “Determinación de la forma de las partículas”.**

El ensayo consiste en dos operaciones de tamizado. En primer lugar, mediante el uso de tamices, se divide al muestra en fracciones granulométricas d_i/D_i . Cada una de las fracciones granulométricas se criban a continuación empleado para ello tamices de barras paralelas y separadas D/2.

El índice de lajas global se calcula a partir de la masa total de las partículas que pasan por los tamices de barras expresado como porcentaje del total de la masa seca de las partículas sometidas a ensayo. El resultado se muestra según la siguiente expresión:

$$IL = (M_2/M_1) \times 100$$

Donde,

M_1 es la suma de las masas de las fracciones granulométricas d_i/D_i , en gramos

M_2 es la suma de las masas de las partículas que pasan por los tamices de barras de anchura D/2 correspondientes a cada fracción granulométrica, en gramos.

➤ **Caras de fractura según la norma UNE EN 933-5 “Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso”**

Esta norma solo es de aplicación para las fracciones granulométricas comprendidas

entre 4 y 63 mm. El ensayo consiste en la separación manual de partículas de una muestra de ensayo de áridos gruesos en los siguientes grupos:

- Partículas trituradas, incluidas las partículas totalmente trituradas;
- Partículas redondeadas, incluidas las partículas totalmente redondeadas.

Se determina la masa de cada uno de estos grupos y se expresa en forma de porcentaje de la masa de la muestra de ensayo.

$$C_{(c,r,tc \text{ o } tr)} = \frac{M_{(c,r,tc \text{ o } tr)}}{M_1} \times 100$$

Donde,

$M_{(c,r,tc \text{ o } tr)}$ son las masas de las partículas trituradas, las partículas redondeadas, las partículas totalmente trituradas y las partículas totalmente redondeadas de la muestra de ensayo, expresada en gramos.

M_1 es la masa de la muestra de ensayo, expresada en gramos.

➤ **Equivalente de arena según la norma UNE EN 933-8 “ Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena”**

Mediante este ensayo se determina el valor del equivalente de arena de la fracción granulométrica 0/2 mm de los áridos finos y de la mezcla total de los áridos.

En una probeta graduada, se vierte la muestra de ensayo de arena y una pequeña cantidad de solución floculante y se agita para liberar de la muestra de ensayo los recubrimientos de arcilla de las partículas de arena. A continuación “se irriga” la arena con una cantidad adicional de la misma solución floculante para favorecer la suspensión de las partículas finas sobre la arena. Tras 20 minutos, se calcula el valor del equivalente de arena (SE) a partir de la altura del sedimento, expresado como porcentaje de la altura total de material floculado en la probeta:

$$SE = (h_2/h_1) \times 100$$

Donde,

h_1 es la altura del nivel superior del floculado con relación a la base de la probeta.

h_2 es la altura del sedimento, midiendo la distancia entre la cara inferior del lastre cilíndrico del pistón y la cara superior del disco introduciendo la regla graduada en la ranura del mismo.



Figura 36. Ensayo del equivalente de arena

➤ **Determinación de la afinidad entre áridos y betún según la norma UNE EN 12697-11.**

Este ensayo muestra una medida indirecta de la capacidad de un ligante para adherirse a varios áridos, o de varios ligantes para adherirse a un árido dado. Los procedimientos pueden también usarse para evaluar el efecto de la humedad en una combinación árido-ligante dado con o sin agentes de adhesión.

En este caso se utiliza el método estático, que consiste en coger una muestra de 150 partículas que pasen por el tamiz de 11,2 mm y que queden retenidas en el tamiz de 8 mm, o que pasen por el tamiz de 10 mm y queden retenidas en el de 6,3 mm.

Se colocan las partículas de árido en la cubierta de mezclado y se añade una cantidad de ligante equivalente al 4% en masa de las partículas de árido. Si después de 5 minutos de mezclado algunas partículas del árido no están completamente recubiertas, se repite el proceso con otras partículas y se aumenta la proporción de ligante, hasta conseguir una mezcla con la que el recubrimiento del árido sea completo.

Se deja el recipiente de fondo plano en reposo durante $1h \pm 5 \text{ min}$, después se cubre

por completo la probeta recubierta con agua destilada a una temperatura de $(19 \pm 1) ^\circ\text{C}$ y se mantiene dicha temperatura durante un periodo de (49 ± 1) h.

Tras la inmersión durante el periodo establecido, se decanta el agua y se deja secar la probeta recubierta. Se examina la muestra seca, partícula a partícula, mientras aún están en el o los recipientes de fondo plano para ver si existen partículas cuyo recubrimiento de ligante sea incompleto.

El resultado para cada origen del árido es el número de partículas con recubrimiento de ligante incompleto. En el caso de ensayos que se hayan repetido, el resultado debe ser el valor medio de los cuatro resultados.

2. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.

Por cada mezcla se han realizado las siguientes muestras:

- Densidad aparente y ensayo Marshall: 3 probetas Marshall
- Densidad máxima: En torno a 1.000 g de mezcla
- Contenido de ligante soluble: En torno a 1.500 g de mezcla
- Sensibilidad al agua: 6 probetas Marshall
- Ensayo de rodadura: 2 probetas de pista de 60 mm de espesor mediante compactador de placa.
- Ensayo SCB: 3 probetas de 150 mm de diámetro compactadas por giratoria
- Ensayo rigidez: 3 probetas Marshall
- Ensayo de fatiga: 4 probetas de pista de 50 mm de espesor mediante compactador de placa.



Figura 37. Material preparado para la realización de ensayos

2.1. Preparación de probetas Marshall.

Las probetas Marshall se han fabricado siguiendo la normativa UNE-EN 12697-30 "Preparación de la muestra mediante compactador de impactos". Para cada ensayo se fabrican 3 probetas, de esta forma podemos observar si existe alguna desviación entre los resultados obtenidos.

Previamente, se han preparado las bandejas con el peso de mezcla deseado e introducidas en una estufa hasta comprobar que la mezcla ha alcanzado la temperatura deseada, según el tipo de ligante utilizado. Antes de su compactación se deben tener los moldes y utensilios en una estufa a la misma temperatura durante 24 horas.

Para la compactación se utiliza una placa base en la parte inferior, seguido del molde de la probeta y por último el cuello. Para el vertido de la mezcla nos ayudamos de un embudo, para evitar la pérdida de material. Además se colocan papeles en la parte superior e inferior de la probeta con el fin de que el material no se adhiera a las superficies de contacto. Antes de compactar la probeta se le dan 25 golpes con una espátula, 15 en la periferia y 10 en su parte central, para que la mezcla quede lo más regular posible.

Se coloca la probeta en el compactador Marshall. Se compacta por impacto dando 75 golpes por cara en el caso de la mezcla AC22 y 50 golpes por cara para la SMA16. Una vez compactada, se quitan los papeles de los extremos y se numera.

Se dejan endurecer las probetas un mínimo de dos horas y se procede al desmoldado, con ayuda de la prensa.



Figura 38. Preparación probetas Marshall

2.2. Preparación de probetas para ensayo de rodadura mediante compactador de placa

Las probetas que posteriormente se emplearan para el ensayo de rodadura se han elaborado siguiendo la norma UNE-EN 12697-33 “Elaboración de probetas con compactador de placa”

Para la realización del ensayo de rodadura se necesitan probetas en forma de paralelepípedo, con unas dimensiones de 26 mm de ancho y 32 de longitud. El espesor de la probeta dependerá del que posteriormente se diseñará en obra. Se prepara, al igual que para las probetas Marshall, una bandeja con el peso de la muestra, calculado según la densidad máxima obtenida y el volumen de la probeta deseado.

En este caso se ha utilizado un rodillo que se mueve sobre placas de acero de deslizamiento vertical, cuyo procedimiento consiste en un rodillo de acero que rueda sobre las placas de deslizamiento colocadas verticalmente sobre el molde sobre la parte superior de la mezcla bituminosa. Durante la compactación, la mesa se mueve horizontalmente de una parte a la otra de la placa de mezcla, con una velocidad de desplazamiento relativo de 250 ± 100 mm/s. Se debe asegurar que la temperatura del equipo haya alcanzado la temperatura deseada de 150°C.



Figura 39. Preparación de probetas mediante compactador de placa

Una vez está compactada, se deja enfriar durante un día y posteriormente se desmolda.

2.3. Preparación de probetas de 150 mm de diámetro mediante compactador giratorio

Las probetas que posteriormente utilizamos en el ensayo de tracción indirecta, ensayo SCB, son probetas de 150 mm de diámetro. Este tipo de probetas solo son posibles mediante compactación giratoria.

La preparación de muestras mediante compactador giratorio sigue la normativa UNE-EN 12697-31 "Preparación de la muestra mediante compactador giratorio". Esta compactación se consigue por la acción simultánea de una compresión estática débil, y la acción de un esfuerzo cortante resultante del movimiento del eje de la probeta, que genera una superficie cónica.

La masa de la mezcla necesario se calcula a partir de la densidad requerida y el volumen que buscamos de probeta, teniendo en cuenta que el molde empleado es de 150 mm. En este caso se preparan de 70 mm de altura para posteriormente poder retirar las caras superficiales y obtener una probeta de 50 mm, tal y como exige el ensayo SCB. La mezcla bituminosa se introduce en un molde cilíndrico, limitado por placas de suplemento, todos ellos previamente calentados en una estufa a temperatura deseada. Al igual que en las probetas Marshall, se colocan dos papeles en las caras superior e inferior de la probeta para evitar la adherencia de la mezcla a las superficies.

Una vez terminada la compactación, se necesita de la ayuda de un gato hidráulico para desmoldar la probeta.



Figura 40. Preparación de probetas de 150 mm mediante compactador giratorio

2.4. Preparación de mezcla para determinación de densidad máxima.

La mezcla dispuesta en las bandejas debe tener una masa, expresada en gramos (g) de, al menos 50 veces el valor numérico del tamaño nominal máximo de partícula del árido expresado en milímetros (mm), (es decir, el mayor tamaño de tamiz especificado de la mezcla) con un mínimo de 250 g. Las muestras se deben soltar y separar en partículas gruesas y aglomeraciones. Las aglomeraciones no deben ser mayores de 6 mm. Si el material no está lo suficientemente blando como para que se pueda separar manualmente, se calienta sobre una bandeja en una estufa a una temperatura que no superior a 110 °C, pero sólo hasta que se pueda manipular adecuadamente.



Figura 41. Material para obtener la densidad máxima

2.5. Preparación de mezcla para ensayo de recuperación de betún

En un recipiente adecuado se coloca una cantidad de mezcla bituminosa suficiente para que la cantidad de ligante que se recupere este comprendida entre 120 g y 150 g. Posteriormente se vierte alrededor de 1500 ml de disolvente y se deja reposar durante un tiempo para comenzar con el ensayo de recuperación de betún mediante centrifugación.



Figura 42. Recipiente con mezcla para realizar el ensayo de recuperación de betún

3. ENSAYOS TIPO REALIZADOS

3.1. Determinación de la densidad aparente

La densidad aparente se define como la masa por unidad de volumen, incluidos los huecos de aire, de una probeta bituminosa. Para su cálculo se ha consultado la norma UNE-EN 12697-6 “Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas”.

Existen varios métodos para determinar la densidad aparente de una probeta bituminosa compactada, en este caso se han aplicado dos de ellos, mediante método hidrostático, y mediante método geométrico, y se realizan para como mínimo 3 probetas.

➤ Método hidrostático

Para este método se necesita un baño de agua que permita mantener el agua a una temperatura uniforme de 25 ± 1 °C. Debe estar equipado con una rejilla para asegurar la

circulación del agua alrededor de la probeta de ensayo y una altura tal que se encuentre sumergida por como mínimo 20 mm de columna de agua.

En primer lugar, nos debemos asegurar que las probetas estén totalmente secas, para recoger el peso en el aire en seco. Posteriormente se sumergen en el baño durante 30 minutos, de esta manera el agua satura la probeta ocupando los huecos. Por último se hacen dos pesadas, una de la probeta sumergida y otro retirando la probeta del baño y eliminando el agua de su superficie ayudándonos de una gamuza. El cálculo sería:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w$$

Donde,

ρ_{bssd} es la densidad aparente de la probeta mediante el método de superficie saturada seca, en kilogramos por metro cúbico (Kg/m³);

m_1 es la masa de la probeta seca, en gramos (g);

m_2 es la masa de la probeta en el agua, en gramos (g);

m_3 es la masa de la probeta con superficie saturada seca, en gramos (g);

ρ_w es la densidad del agua a la temperatura de ensayo, en kilogramos por metro cúbico (Kg/m³).



Figura 43. Determinación de la densidad aparente

➤ **Método geométrico**

El método geométrico consiste en determinar las dimensiones de la probeta, en milímetros, con la ayuda de un pie de rey y la masa de la probeta seca. Para las dimensiones se debe recoger el espesor en 4 puntos. El cálculo quedaría:

$$\rho_{bdim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} * h * d^2} * 10^3$$

Donde,

ρ_{bdim} es la densidad aparente de la probeta mediante el método geométrico, en kilogramos por metro cúbico (Kg/m³);

m_1 es la masa de la probeta seca, en gramos (g);

h es la altura de la probeta, en milímetros (cm);

d es el diámetro de la probeta, en milímetros (cm).



Figura 44. Densidad aparente según método geométrico. Probetas Marshall

Para las pistas se ha seguido el mismo procedimiento para determinar la densidad aparente. En este caso, para el cálculo de las dimensiones se mide su espesor en 6 puntos.



Figura 45. Densidad aparente según método geométrico. Probetas de pista

3.2. Determinación de la densidad máxima

La densidad máxima es la masa por unidad de volumen, sin huecos de aire, de una mezcla bituminosa a una temperatura de ensayo conocida. Siguiendo la norma UNE-EN 12697-5 “Determinación de la densidad máxima”.

Para su determinación se prepara una bandeja con una muestra de la mezcla bituminosa. Es muy importante separar la muestra, de manera que no existan aglomeraciones mayores de 6 mm. El procedimiento consiste en pesar el picnómetro vacío, incluyendo la pieza de cabeza (m_1), de volumen conocido. Posteriormente, se introduce la muestra de ensayo seca y se vuelve a pesar el picnómetro, pero esta vez junto con la muestra (m_2). Se llena el picnómetro con agua sin aire disuelto o con disolvente, hasta un máximo de 30 mm por debajo de la junta de cabeza. Se evacua el aire atrapado, aplicando un vacío parcial gracias a una bomba. Por último se fija la pieza de cabeza del picnómetro y se llena de agua cuidadosamente (comprobando que no se introduce aire) hasta la marca de referencia y se procede a pesarlo (m_3). El cálculo matemático sería:

$$\rho_{mv} = \frac{(m_2 - m_1)}{10^3 * V_p - (m_3 - m_2)/\rho_w}$$

Donde,

ρ_{mv} es la densidad máxima del material bituminoso determinada por el procedimiento volumétrico en Kg/m^3 ;

m_1 es la masa del picnómetro más la pieza de cabeza en gramos (g);

m_2 es la masa del picnómetro más la pieza de cabeza y muestra de ensayo, en gramos (g);

m_3 es la masa del picnómetro más la pieza de cabeza, muestra de ensayo y en gramos (g);

V_p es el volumen del picnómetro, cuando está lleno hasta la marca de referencia, en metros cúbicos (m^3);

ρ_w es la densidad del agua a la temperatura de ensayo, en Kg/m^3 .



Figura 46. Realización del ensayo de densidad máxima

3.3. Obtención del contenido de huecos

Para el cálculo del contenido de huecos se ha seguido la normativa UNE EN 12697-8 “Determinación del contenido de huecos en las probetas bituminosas”. Este procedimiento sirve para calcular dos características volumétricas de una probeta bituminosa compactada: el contenido de huecos de aire y el contenido de huecos rellenos con ligante existentes en el árido mineral.

➤ **Contenido de huecos de aire**

El contenido de huecos de aire se define como el volumen ocupado por los huecos de aire en una probeta bituminosa, expresado como un porcentaje del volumen total de la probeta. El contenido de huecos de aire se calcula mediante:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} * 100 \%$$

Donde,

V_m es el contenido de huecos de aire de la mezcla, expresado como un porcentaje (%)

ρ_m es la densidad máxima de la mezcla, expresada en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3);

ρ_b es la densidad aparente de la probeta, expresada en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3).

➤ **Contenido de huecos rellenos**

Por otro lado, el porcentaje de huecos rellenos se calcula a partir del contenido de ligante, de los huecos existentes en el árido mineral, de la densidad aparente de la probeta y de la densidad del ligante, es decir:

$$VFB = \left(\frac{B * \rho_b / \rho_B}{VMA} \right) * 100 \%$$

Donde,

VFB es el porcentaje de huecos rellenos con ligante existentes en el árido mineral;

B es el porcentaje de ligante en la probeta (en una mezcla del 100%);

ρ_b es la densidad aparente de la probeta, expresada en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3);

ρ_B es la densidad del ligante, expresada en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3);

VMA es el contenido de huecos del árido mineral, expresado como un porcentaje;

3.4. Contenido de ligante soluble

Mediante este ensayo se puede determinar el contenido de ligante soluble de la mezcla bituminosa, es decir, el porcentaje en masa de ligante que se extrae de una muestra seca. Este ensayo es necesario para controlar la calidad durante la producción de las mezclas en la planta y se realiza de acuerdo con la norma UNE EN 12697-1.

El método utilizado en este caso ha sido el de una centrífuga de flujo continuo y alta velocidad. El procedimiento consiste en utilizar un disolvente capaz de disolver el betún de la mezcla. Se fija el embudo de alimentación centrado sobre el embudo de la centrífuga y, cuidadosamente, se vierte sobre el embudo de alimentación la solución de ligante obtenida en el proceso de extracción del ligante, dejándolos pasar por los tamices de 2 mm y 0,63 mm. El equipo debe estar provisto de un recipiente para recoger el disolvente que sea expulsado de la cubeta, y de un drenaje para extraer el disolvente.



Figura 47. Equipo de recuperación de betún por centrifuga

Se recoge el efluente centrifugado. Se retira el vaso que contiene el filler extraído y se

coloca en el horno para secarlo a (110 ± 5) °C. Después del secado hasta masa constante, se vuelven a pesar los dos vasos para calcular, por diferencia de masas, el filler recuperado. Se vuelve a pesar el tamiz para determinar la cantidad de materia mineral retenida.

3.5. Ensayo Marshall

El método de ensayo para determinar los valores de estabilidad, deformación y cociente Marshall de probetas de mezclas bituminosas se realiza de acuerdo a la norma UNE EN 12697-34.

Las probetas se deben compactar de acuerdo con la norma UNE EN 12697-30, asegurándose de que se aplican 75 impactos en cada lado dentro del intervalo aceptable de temperaturas específicas, se realiza este número de impactos al tratarse de una mezcla para tráfico pesado.

Las probetas una vez desmoldadas y calculada la densidad aparente de cada probeta, se sumergen, apoyadas sobre la cara plana, en un baño de agua durante un periodo de tiempo no inferior a 40 min ni superior a 60 min. La temperatura del agua del baño se mantiene a (60 ± 1) °C.

Antes de realizar el ensayo, se debe calentar el cabezal de ensayo, ya sea sumergiéndolo también en el baño de agua, o mediante la ayuda de una estufa. La probeta se saca del baño de agua y se coloca en el centro sobre su lado en la mordaza de ensayo, comprobando que existe un buen contacto superficial entre la probeta y la mordaza de ensayo. Este conjunto completo se coloca en el centro en la máquina de ensayo. Se aplica la carga a la probeta hasta alcanzar una velocidad constante de deformación de (50 ± 2) mm/min fuera del periodo transitorio. Se continua la aplicación de esta carga hasta que se obtenga la lectura máxima en el dispositivo de medición de la carga. Se registra la carga indicada. Esta parte del ensayo se debe realizar antes de que transcurran 40 segundos después de sacar la probeta del baño de agua.

La carga máxima obtenida representa la estabilidad de la mezcla solamente si la altura de la probeta es igual a los 63,5 mm requeridos. Se debe registrar en el informe una estabilidad corregida, multiplicando la carga máxima por el factor de corrección, calculado mediante las fórmulas siguientes utilizando el volumen de la probeta:

$$c=5,2e^{-0,0259h}=5,2e^{-3,2\oplus 10^{(6)}v}$$

donde,

c es el factor de corrección

h es la altura de la probeta en milímetros (mm)

v es el volumen de la probeta, en milímetros cúbicos.

La estabilidad, S, se registra al 0,1 kN más cercano.

Para obtener el valor de la deformación F , se mide en el gráfico de fuerza frente a deformación la distancia desde la intersección de la tangente y la línea base hasta el punto en que se alcanza la carga máxima, M . Los valores de las deformaciones F_t y F_T se obtienen de modo similar, y se registran al 0,1 más cercano.

El cociente Marshall se debe obtener calculando el cociente S/F , y el valor obtenido se registra al 0,1 kN/mm más cercano.



Figura 48. Equipo de ensayo Marshall

3.6. Ensayo de rodadura

Este ensayo mide la susceptibilidad de los materiales bituminosos a deformarse, se evalúa por medio de la rodera formada por pasadas repetidas, a temperatura constante, de una rueda sometida a carga. Se sigue el procedimiento B de y dispositivo de tamaño pequeño especificado en la norma UNE EN 12697-22. La máquina de ensayo en pista consiste en una rueda sometida a carga que se mueve sobre una muestra sujeta de forma segura en una mesa. La mesa por debajo de la rueda se mueve hacia delante y hacia atrás,

y un dispositivo proporciona el control de la velocidad a la que se forma una rodera en la superficie de la probeta. La oscilación vertical en el mecanismo de la rueda sometida a carga debe ser menor de 0,25 mm.

El equipo también dispone de un dispositivo para medir la temperatura, de manera que aseguremos que la temperatura de la probeta sea uniforme y se mantenga constante respecto a la temperatura específica de 60 °C.

Una vez puesta en marcha la máquina, se toman lecturas del desplazamiento vertical de la rueda, primero la lectura inicial y después 6 o 7 veces como mínimo en la primera hora, y después de esto, al menos, una lectura cada 500 ciclos de carga. La posición vertical de la rueda se define como el valor medio del perfil de la probeta en una longitud de ± 50 mm aproximadamente del centro del área de carga en el punto medio del recorrido, medido en, al menos, 25 puntos aproximadamente igualmente espaciados. El ensayo se continúa hasta que se apliquen 10.000 ciclos de carga, o hasta que la profundidad de la rodera sea de 20 mm, lo que ocurra antes.

Los valores que se indican son:

- Inclinación de la rodada en aire: la pendiente de deformación en pista, en mm para 10^3 ciclos de carga, se calcula mediante la fórmula:

$$WTS_{Aire} = \frac{(d_{10.000} - d_{5.000})}{5}$$

donde,

$d_{10.000}$, $d_{5.000}$ es la profundidad de la rodera después de 5.000 ciclos de carga y de 10.000 ciclos de carga en milímetros (mm)

Si el ensayo se termina antes de llegar a 10.000 ciclos de carga, la pendiente de deformación en pista se debe calcular sobre la parte lineal de la curva representativa de la profundidad del surco, a condición de que la curva corresponda a 2.000 ciclos de carga como mínimo.

- Porcentaje de la profundidad media de la rodera, PRD_{Aire} : corresponde a la profundidad proporcional media para el material sometido a ensayo, en N ciclos.

- Profundidad media de la rodera, RD_{Airp} : corresponde a la profundidad media de la rodera para el material sometido a ensayo, en N ciclos.

3.7. Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa

Este ensayo, definido por la norma UNE EN 12697-12, describe el método para determinar el efecto de la saturación y de una inmersión acelerada en agua, sobre la resistencia a la tracción indirecta en probetas cilíndricas de mezclas bituminosas.

El procedimiento consiste en dividir un conjunto de probetas cilíndricas en dos subconjuntos del mismo número de probetas equivalentes, que estén acondicionadas de la misma manera. Un subconjunto se mantiene seco a la temperatura ambiente, mientras que el otro se satura y mantiene en agua a una temperatura de acondicionamiento elevada. Después del acondicionamiento, se determina la resistencia a la tracción indirecta de cada uno de los dos subconjuntos, de acuerdo con lo establecido en la norma UNE EN 12697-23. A continuación, se determina la razón entre la resistencia a la tracción indirecta del subconjunto acondicionado en agua y la resistencia a la tracción indirecta del subconjunto acondicionado en seco, y se expresa como un porcentaje.

El subconjunto de probetas húmedas se coloca sobre un estante perforado del recipiente de vacío lleno con agua destilada a (20 ± 5) °C de temperatura, hasta un nivel de 20 mm, como mínimo, por encima de la superficie superior de las probetas. Se aplica vacío hasta obtener una presión absoluta de $(6,7 \pm 0,3)$ kPa en un periodo de tiempo de (10 ± 1) min.

El vacío se mantiene durante (30 ± 5) min. Después se deja que se recupere lentamente la presión atmosférica en el recipiente de vacío. A continuación, se dejan las probetas sumergidas en el agua durante otro periodo de (30 ± 5) min. El subconjunto de probetas húmedas se colocan en un baño de agua a aproximadamente 40°C durante un periodo de tiempo de 60 a 72 horas.

El subconjunto de probetas secas simplemente se deberán conservar sobre una superficie plana a temperatura ambiente (20 ± 5) °C.

El procedimiento de ensayo para obtener la resistencia a tracción indirecta de ambos

subconjuntos se realiza introduciendo las probetas en un baño de agua a la temperatura de ensayo durante como mínimo 2 horas. Pasado ese tiempo, se van sacando probeta a probeta para ensayar, retirando mediante una toalla la humedad superficial. El ensayo de resistencia a tracción indirecta se debe realizar antes de que transcurra 1 min después de sacar la probeta de agua de acondicionamiento.

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

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

donde,

ITSR es la razón de la resistencia a la tracción indirecta, expresada en porcentaje (%)

ITS_w es el porcentaje de resistencia a la tracción indirecta del grupo de probetas húmedas, expresado en kilopascales (kPa), redondeado a tres dígitos significativos

ITS_d es el porcentaje de resistencia a la tracción indirecta del grupo de probetas secas, expresado en kilopascales (kPa), redondeado a tres dígitos significativos.



Figura 49. Ensayo de sensibilidad al agua

ANEXO 2. ENSAYO DE FATIGA

1. RESUMEN DATOS MUESTRAS EMPLEADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS.

En aquellos casos en los que no aparece un valor dado, puede ser debido tanto a un fallo del ensayo, como al rechazo de la probeta.

Los ensayos se han realizado a una temperatura constante de 20°C y una frecuencia de 30 Hz para la aplicación del desplazamiento inicial impuesta. El módulo inicial se calcula a partir de los valores medidos en el ciclo número 100.

- [AC 22 CON BETÓN 35/50](#)

Datos probetas

Tabla 36. Ensayo fatiga. Datos probetas AC 22

AC 22 BIN 35/50 S									
Nº	P. aire	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
1	2458,8	48,56	48,89	49,54	50,81	49,39	51,87	52,08	49,88
2	2445,7	51,14	49,42	47,81	46,08	49,77	52,58	52,65	49,79
3	2588,8	51,67	51,63	51,48	51,17	50,02	52,60	52,84	50,06
4	2555,5	51,48	51,14	50,85	50,97	49,64	52,55	52,79	50,10
5	2537,4	51,52	51,19	51,04	51,04	48,96	52,29	52,57	49,55
6	2534,8	51,19	50,75	50,85	50,85	49,26	52,91	52,92	50,05
7	2584,0	51,64	51,73	51,38	51,38	49,46	52,96	53,14	50,21
8	2524,5	51,33	50,73	50,36	50,36	49,22	52,89	53,16	50,37

Datos ensayo

Tabla 37. Ensayo fatiga. Resultados ensayo AC 22

Datos Ley de fatiga para S 20 con 4,4% Betún 35/50				
Nº	Módulo inicial (Mpa)	Microdeformaciones (µm/m)	Nº ciclos hasta 50% Módulo	50% Módulo
1	7261	125	1.010.000	3625
2	7209	120	1.326.754	3602
3	7289	130	980.794	3640
4	7318	135	724.968	3655
5	7183	110	1.729.049	3588
6	6955	100	2.014.939	3468
7	7420	140	588.366	3710
8	7607	150	375.391	3799

Ley de fatiga

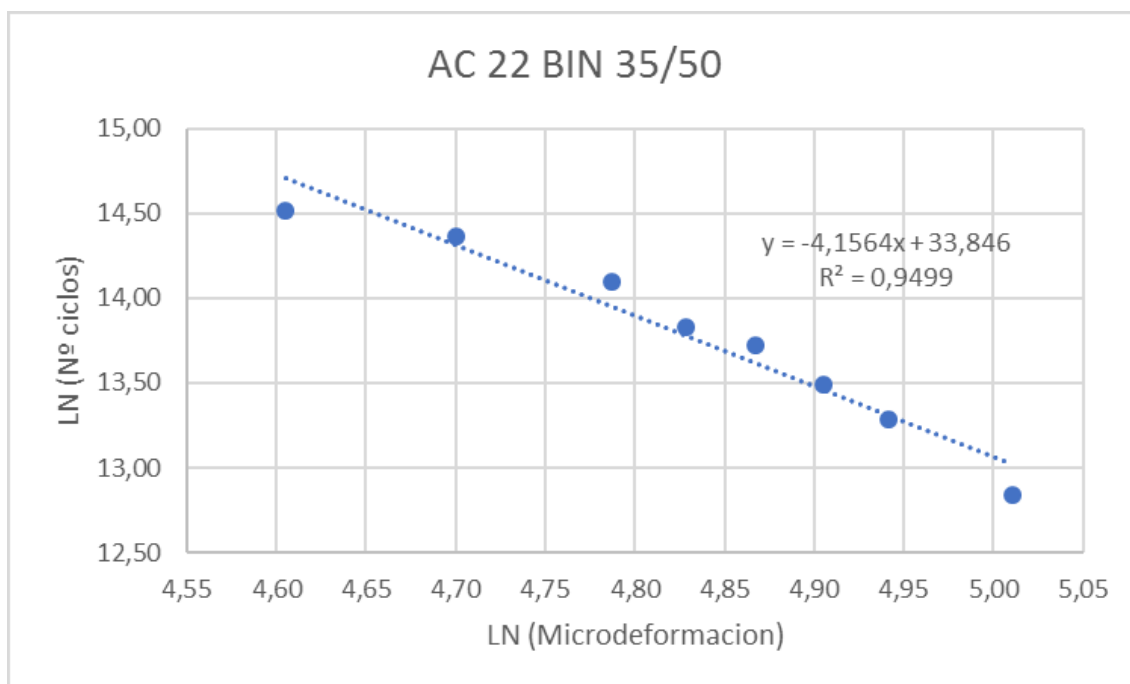


Figura 50. Ley de fatiga AC 22

Ley de fatiga: $LN(n^\circ \text{ ciclos}) = -4,1564 * LN(\text{Microdeformación}) + 33,846$

Por tanto, el valor de la microdeformación para un millón de ciclos de $\epsilon_6 = 124 \mu\text{m/m}$

- SMA 16 CON 5,1% DE BETÓN 45/80-65

Datos probetas

Tabla 38. Ensayo fatiga. Datos probetas SMA 16 5,1% BM

SMA 16 CON 5,1% DE BETÓN 45/80-65									
Nº	P. aire	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
9	2458,6	51,17	50,64	50,62	50,50	48,31	51,49	51,39	48,19
10	2475,7	50,79	50,97	50,95	51,36	48,91	52,39	51,74	48,49
11	2480,2	51,29	51,00	50,92	50,50	48,75	51,73	52,28	48,55
12	2497,4	51,67	51,40	51,36	51,60	48,33	51,92	51,98	47,67
13	2521,2	51,16	51,47	51,42	51,37	46,76	50,97	51,36	47,22
14	2482,6	51,23	51,35	51,07	50,80	46,76	50,65	51,04	46,57
15	2437,6	51,16	51,25	50,97	50,86	46,40	51,00	50,37	46,08
16	2498,2	51,48	51,29	51,79	51,36	45,96	50,89	50,87	46,87

Datos ensayo

Tabla 39. Ensayo fatiga. Resultados ensayo SMA 16 5,1% BM

Datos Ley de fatiga para SMA 16 con 5,1% Betón 45/80-65				
Nº	Módulo inicial (Mpa)	Microdeformaciones ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Nº ciclos hasta 50% Módulo	50% Módulo
9	3412	145	1.324.125	1702
10	3517	155	1.060.366	1756
11	3599	165	893.535	1791
12	3663	175	787.877	1830
13	3702	185	623.151	1851
14	3315	135	2.012.512	1652
15	-	195	-	-
16	3775	195	423.151	1886

Ley de fatiga

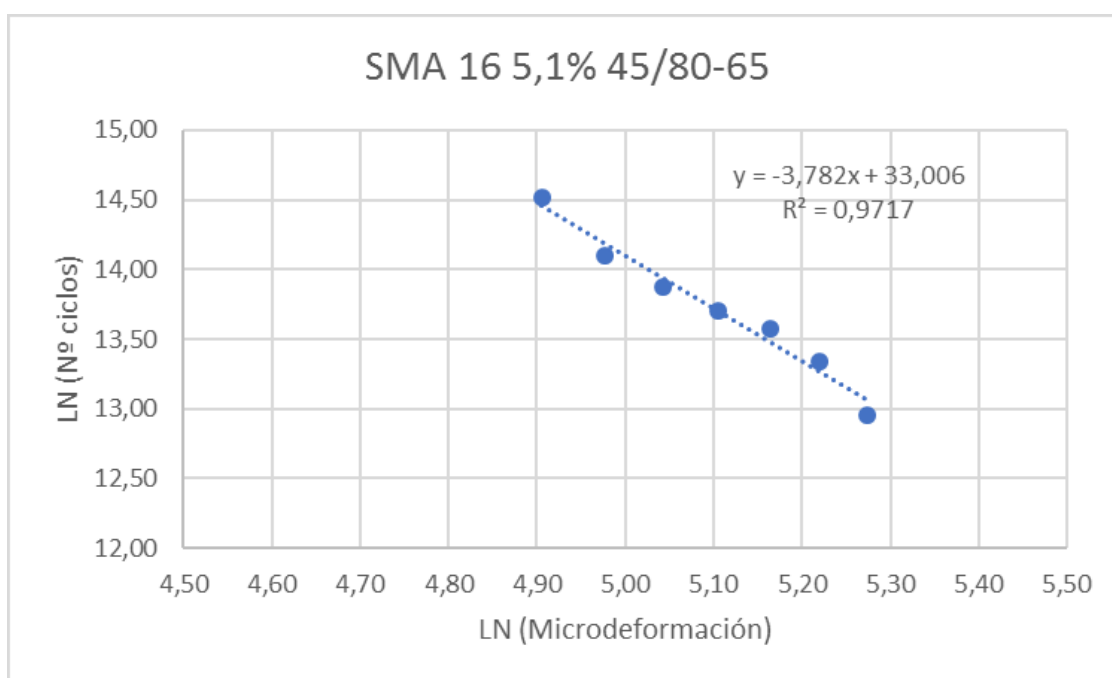


Figura 51. Ley de fatiga SMA 16 5,1% BM

Ley de fatiga: $LN(n^{\circ} \text{ ciclos}) = -3,782 * LN(\text{Microdeformación}) + 33,006$

Por tanto, el valor de la microdeformación para un millón de ciclos de $\epsilon_6 = 160 \mu\text{m/m}$

- SMA 16 CON 5,6% DE BETÓN 45/80-65

Datos probetas

Tabla 40. Ensayo fatiga. Datos probetas SMA 16 5,6% BM

SMA 16 CON 5,6% DE BETÓN 45/80-65									
Nº	P. aire	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
17	2466,8	51,17	50,68	50,15	49,80	48,11	51,79	51,03	45,62
18	2481,1	50,93	50,94	50,97	51,47	47,67	51,52	50,95	45,27
19	2404,9	50,90	50,06	49,07	48,17	47,65	51,64	50,86	45,37
20	2513,1	52,08	51,50	51,12	50,76	47,89	51,63	51,96	45,44
21	2438,2	49,16	49,87	50,30	50,50	47,09	51,77	51,71	46,90
22	2487,9	50,69	50,64	50,46	50,80	46,39	52,22	51,91	46,76
23	2507,0	51,31	51,03	50,75	50,74	46,69	51,78	52,18	47,00
24	2397,0	49,47	49,16	49,22	49,37	46,33	51,81	51,86	46,70

Datos ensayo

Tabla 41. Ensayo fatiga. Resultados ensayo SMA 16 5,6% BM

Datos Ley de fatiga para SMA 16 con 5,6% Betón 45/80-65				
Nº	Módulo inicial (Mpa)	Microdeformaciones (µm/m)	Nº ciclos hasta 50% Módulo	50% Módulo
17	2677	180	852.777	1337
18	2658	170	1.025.451	1326
19	2642	150	1.524.256	1321
20	2698	190	723.699	1340
21	2712	200	658.484	1354
22	2725	210	596.111	1361
23	2759	225	475.118	1378
24	2612	140	1.995.250	1305

Ley de fatiga

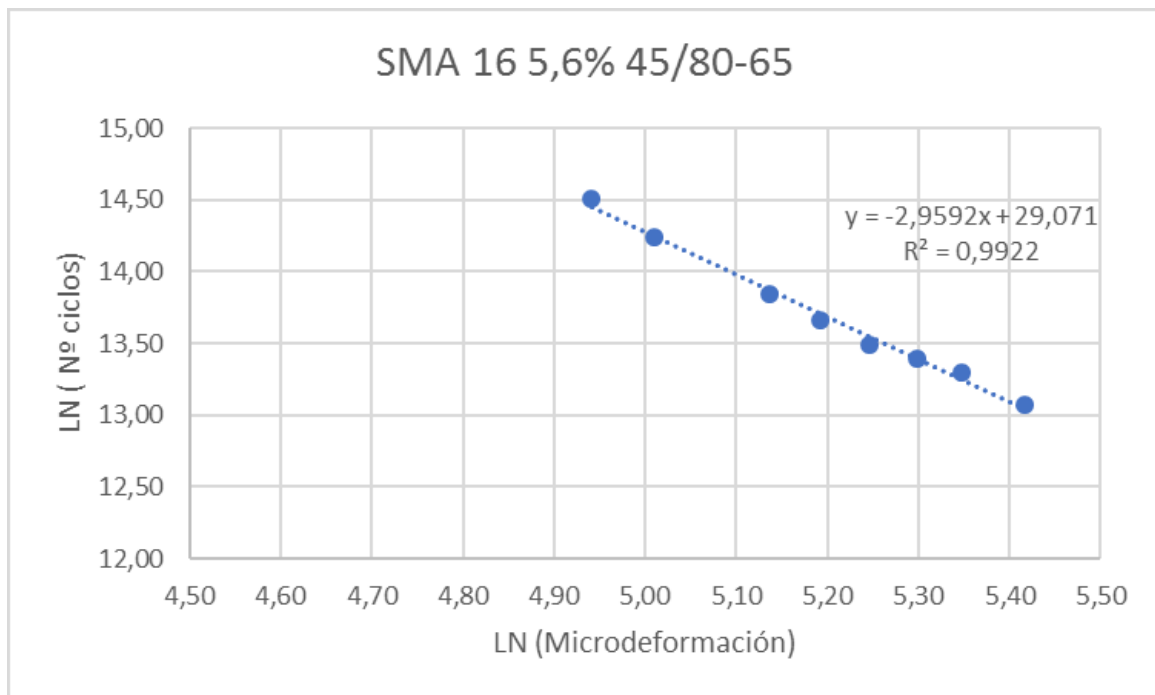


Figura 52. Ley de fatiga SMA 16 5,6% BM

Ley de fatiga: $LN(n^\circ \text{ ciclos}) = -2,9592 * LN(\text{Microdeformación}) + 29,071$

Por tanto, el valor de la microdeformación para un millón de ciclos de $\epsilon_6 = 173 \mu\text{m/m}$

- SMA 16 CON 6,1% DE BETÓN 45/80-65

Datos probetas

Tabla 42. Ensayo fatiga. Datos probetas SMA 16 6,1% BM

SMA 16 CON 6,1% DE BETÓN 45/80-65									
Nº	P. aire	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
25	2392,6	50,21	49,86	49,50	48,86	47,34	50,95	50,70	46,17
26	2415,5	48,10	49,05	49,80	50,46	46,38	50,77	51,43	47,13
27	2482,9	50,42	50,56	51,22	51,58	47,51	51,01	50,72	46,51
28	2489,2	51,71	51,29	50,75	50,88	45,90	50,26	51,03	48,01
29	2505,1	51,56	51,29	51,15	51,23	49,33	52,30	52,48	48,73
30	2490,7	51,40	51,16	51,54	52,10	49,23	52,20	51,91	48,73
31	2455,8	50,68	50,63	50,20	50,70	48,54	52,40	52,71	48,05
32	2478,3	50,33	50,36	50,24	50,57	48,63	52,50	52,51	49,05

Datos ensayo

Tabla 43. Ensayo fatiga. Resultados obtenidos SMA 16 6,1% BM

Datos Ley de fatiga para SMA 16 con 5,6% Betón 45/80-65				
Nº	Módulo inicial (Mpa)	Microdeformaciones (µm/m)	Nº ciclos hasta 50% Módulo	50% Módulo
25	2315	180	955.151	1156
26	2301	160	1.495.874	1149
27	2291	140	2.153.658	1141
28	-	190	-	
29	2322	190	845.362	1161
30	2331	200	784.797	1165
31	2342	210	701.222	1169
32	2351	225	633.284	1175

Ley de fatiga

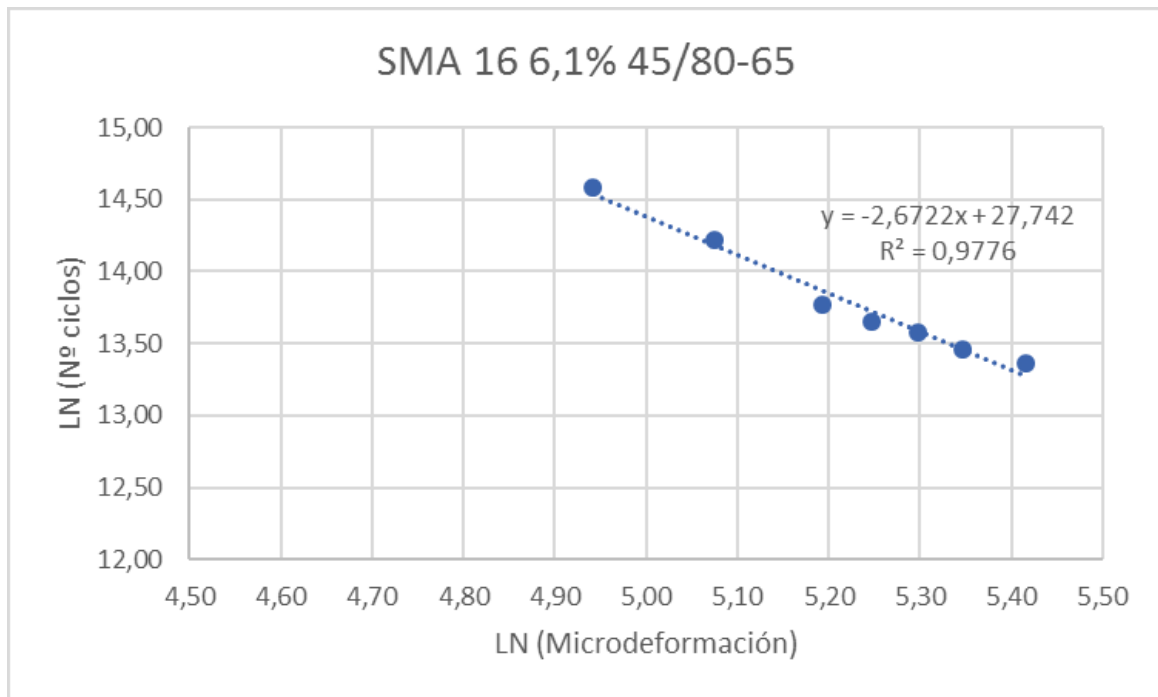


Figura 53. Ley de fatiga SMA 16 6,1% BM

Ley de fatiga: $LN(n^{\circ} \text{ ciclos}) = -2,6722 * LN(\text{Microdeformación}) + 27,742$

Por tanto, el valor de la microdeformación para un millón de ciclos de $\epsilon_6 = 183 \mu\text{m/m}$

ANEXO 3. ENSAYO SCB

1. RESUMEN DATOS MUESTRAS EMPLEADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS.

- AC 22 CON BETÓN 35/50

Datos probetas

Tabla 44. Ensayo SCB. Datos probetas AC 22

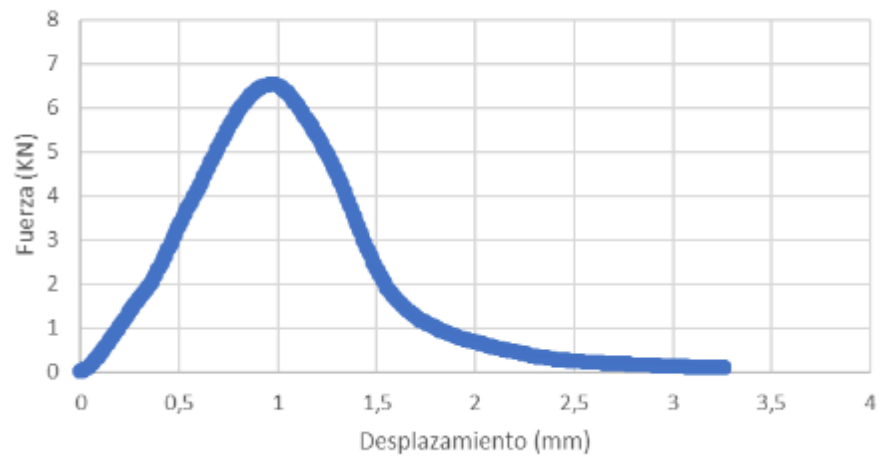
Nº	Peso aire	d_1	d_2	D	w_1	w_2	W	t_1	t_2	t_3	T	a_i	$f(a_i/w)$
1	1057,7	149,31	149,55	149,43	71,1	70,83	70,97	52,84	51,55	51,69	52,03	6,50	4,948
2	1100,7	149,75	150,01	149,88	75,65	75,34	75,50	49,04	51,04	51	50,36	6,66	4,938
3	1064,1	149,63	149,78	149,71	74,54	74,12	74,33	48,51	50,5	50,87	49,96	6,77	4,947
4	997,4	149,63	149,66	149,65	72,02	72,34	72,18	49,65	47	49,22	48,62	4,71	4,884
5	1108,6	149,86	149,68	149,77	73,65	74,07	73,86	51,27	51,68	52,55	51,83	6,30	4,929
6	1091,2	149,63	149,71	149,67	72,8	72,77	72,79	51,68	51,11	52,58	51,79	7,36	4,984

Datos ensayos

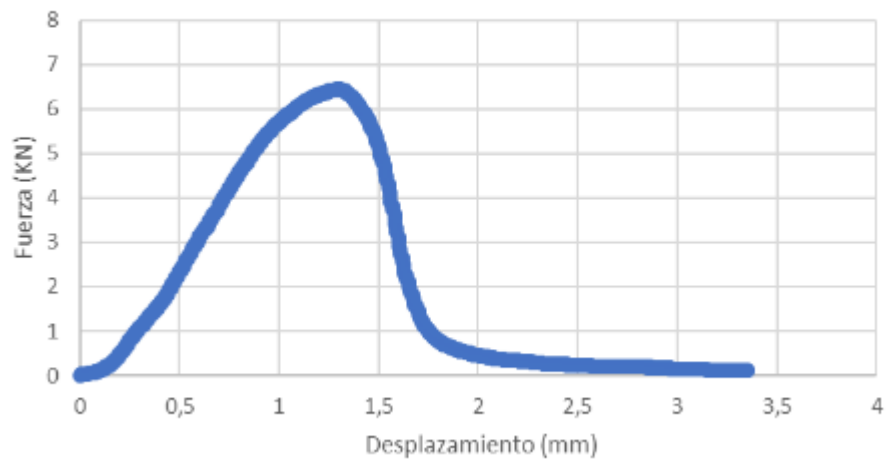
Tabla 45. Ensayo SCB. Resultados ensayo AC 22

Nº	Fmax (KN)	ΔF_{max} (mm)	1/2 Fmax (KN)	Δmdp (mm)	ΔR (mm)
1	6,54	0,98	3,27	1,41	3,26
2	6,44	1,31	3,22	1,59	3,35
3	6,46	1,35	3,23	1,7	3,55
4	6,77	1,3	3,38	1,55	2,72
5	7,42	1,37	3,71	1,66	3,64
6	7,74	1,23	3,87	1,44	2,83

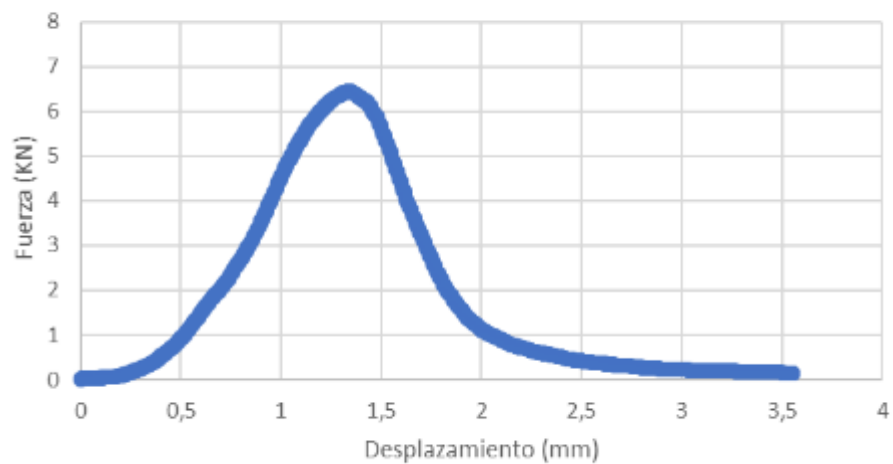
AC 22 - 01



AC 22 - 02



AC 22 - 03



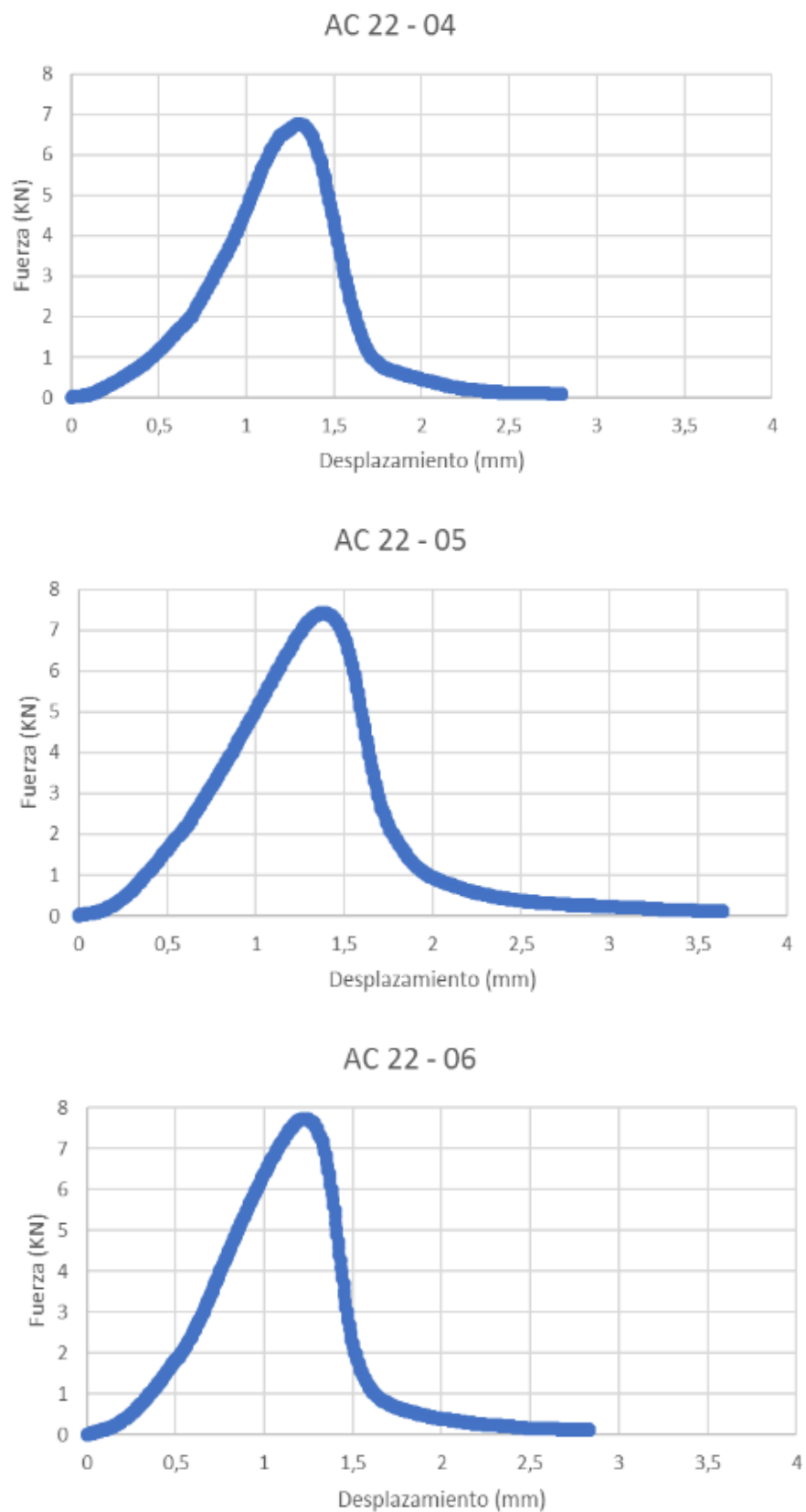


Figura 54. Gráficas fuerza-desplazamiento AC 22

Resultados obtenidos

Tabla 46. Ensayo SCB. Cálculos realizados AC 22 (1)

Nº	ε_{Fmax} (%)	σ_{max} (N/mm ²)	σ_{max} (N/mm ²)	K_i (N/mm ^{3/2})	K (N/mm ^{3/2})	Relación T/D	T/D
1	1,381	3,586		17,748		2,60	
2	1,735	3,639		21,672		2,10	
3	1,816	3,683		21,938		2,03	
4	1,801	3,964	3,9	23,610	22,4	2,20	2,27
5	1,855	4,076		24,279		2,20	
6	1,690	4,255		25,343		2,52	

Tabla 47. Ensayo SCB. Cálculos realizados AC 22 (2)

Nº	TRABAJO (W_i)						ENERGÍA DISIPADA	
	$W_{D,i}$	W_D	$W_{\Delta Fmax,i}$	$W_{\Delta Fmax}$	$W_{\Delta R,i}$	$W_{\Delta R}$	GI_i	GI
1	6,705		3,232		3,473		1999,01	
2	6,72		4,451		2,269		1938,40	
3	6,43	6,44	3,393	3,77	3,037	2,68	1905,02	1895,76
4	5,454		3,292		2,162		1662,49	
5	7,182		4,292		2,889		2050,91	
6	6,162		3,938		2,224		1818,72	

- **SMA 16 CON 5,1% BETÚN 45/80-65**

Datos probetas

Tabla 48. Ensayo SCB. Datos probetas SMA 16 5,1% BM

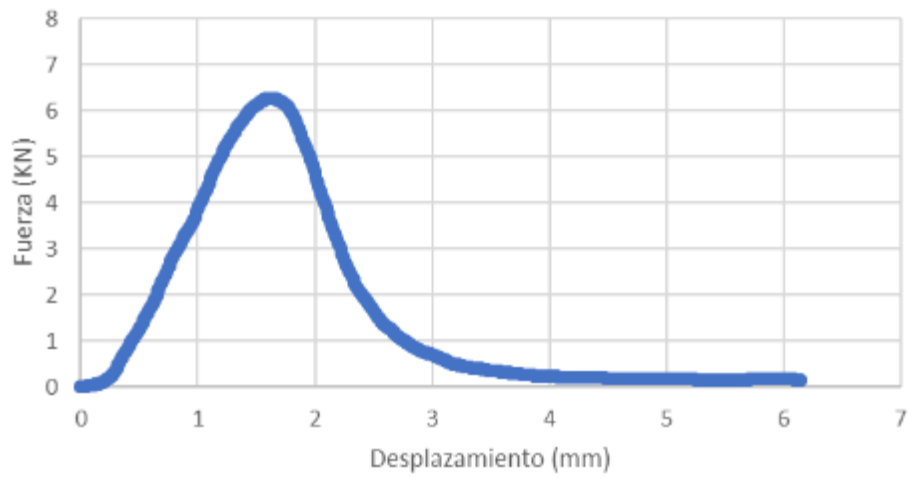
Nº	Peso aire	d_1	d_2	D	w_1	w_2	W	t_1	t_2	t_3	T	a_i	$f(a_i/w)$
7	1109,9	150	149,64	149,82	74,67	75,61	75,14	51,36	51,97	52,34	51,89	6,89	4,949
8	1038,9	149,55	148,65	149,10	71,07	71,54	71,31	51,78	52,17	52,34	52,10	2,74	4,853
9	1027,2	149,26	149,28	149,27	73,32	73,12	73,22	50,32	50,74	50,71	50,59	4,71	4,882
10	1020,3	149,55	149,49	149,52	72,5	73,06	72,78	51,55	51,32	50,51	51,13	4,1	4,870
11	1038,9	149,25	149,04	149,15	72,92	72,07	72,50	51,75	51,48	51,7	51,64	3,63	4,863
12	1071,2	149,69	149,7	149,70	73,89	74,58	74,24	52,32	51,5	51,85	51,89	4,67	4,880

Datos ensayos

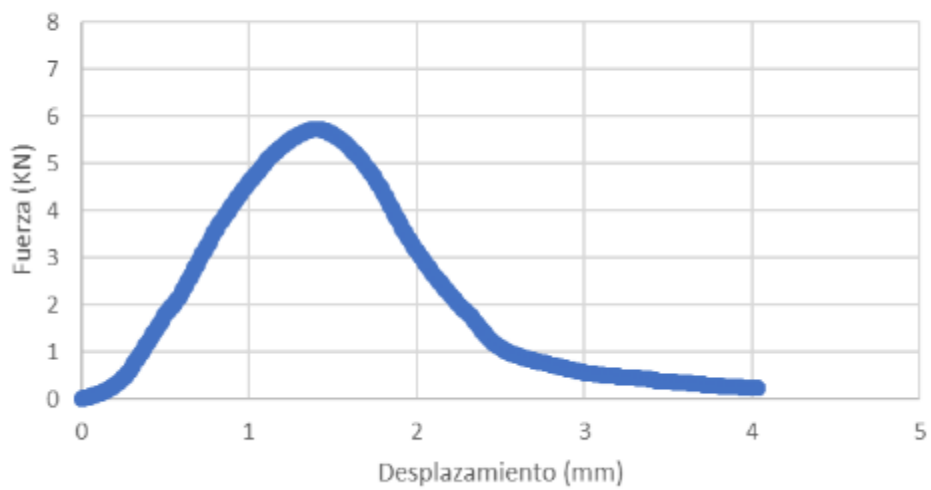
Tabla 49. Ensayo SCB. Resultados ensayo SMA 16 5,1% BM

Nº	Fmax (KN)	ΔF_{max} (mm)	1/2 Fmax (KN)	Δm_{dp} (mm)	ΔR (mm)
7	6,28	1,65	3,14	2,2	6,14
8	5,72	1,42	2,86	2,06	4,03
9	5,79	1,47	2,89	1,94	4,65
10	5,50	1,52	2,75	2,28	4,58
11	6,28	1,99	3,14	2,51	4,63
12	7,40	2,2	3,70	2,63	4,44

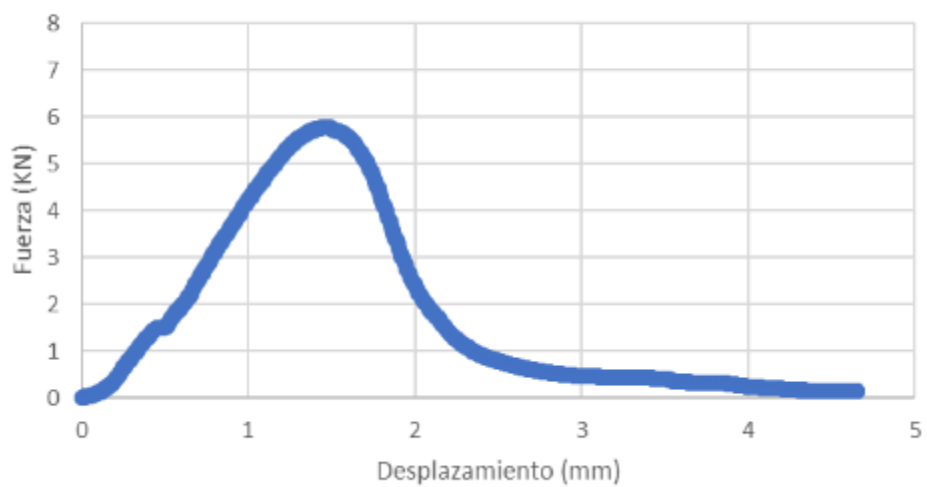
SMA 16 5,1 - 07



SMA 16 5,1 - 08



SMA 16 5,1 - 09



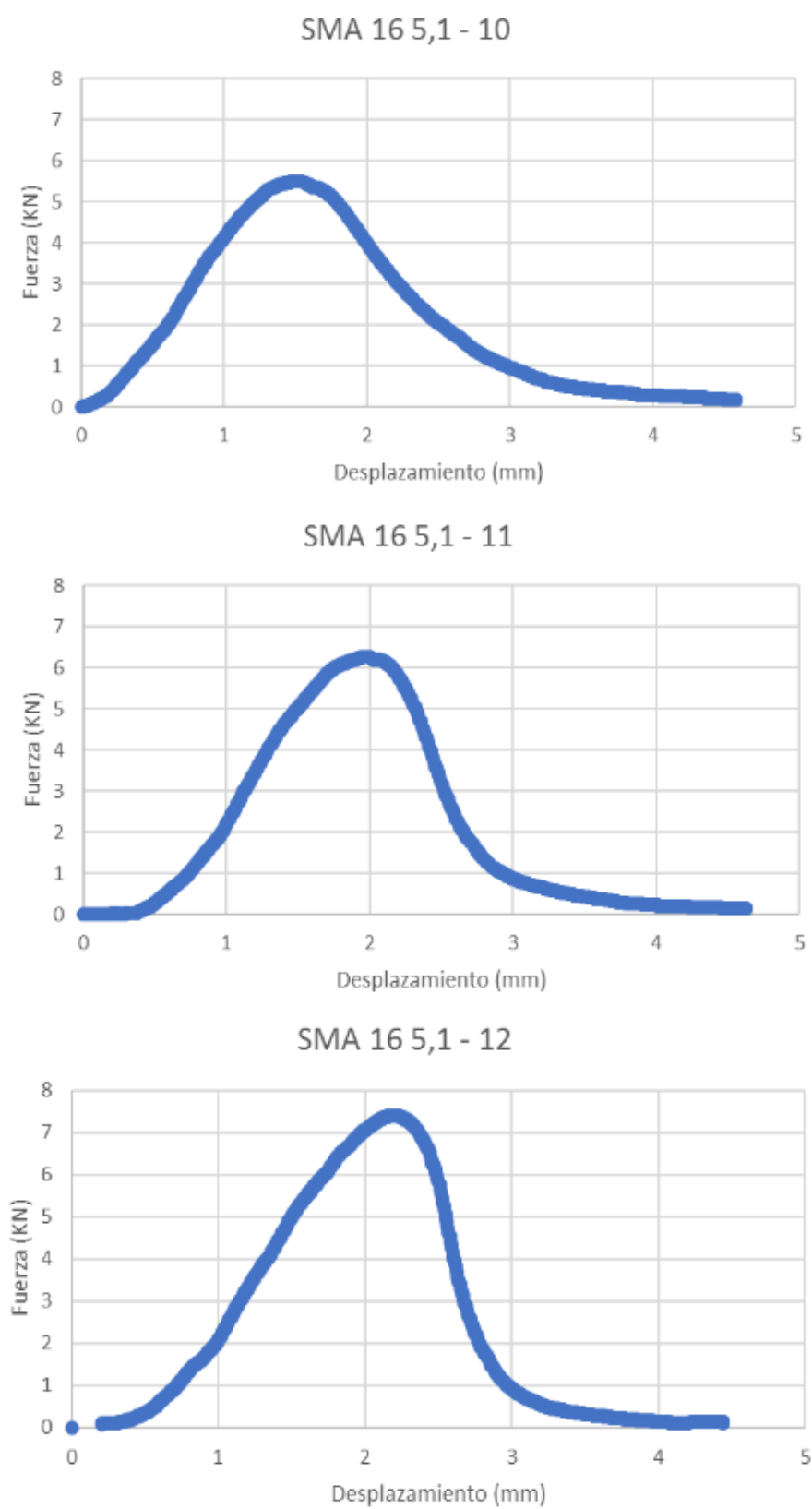


Figura 55. Gráficas fuerza-desplazamiento SMA 16 5,1% BM

Resultados obtenidos

Tabla 50. Ensayo SCB. Cálculos realizados SMA 16 5,1% BM (1)

Nº	ε_{Fmax} (%)	σ_{max} (N/mm ²)	σ_{max} (N/mm ²)	K_i (N/mm ^{3/2})	K (N/mm ^{3/2})	Relación T/D	T/D
7	2,196	3,441		20,497		1,57	
8	1,991	3,138		18,687		1,58	
9	2,008	3,266	3,4	19,453	20,3	1,63	1,48
10	2,088	3,068		18,272		1,47	
11	2,745	3,473		20,688		1,27	
12	2,964	4,063		24,200		1,37	

Tabla 51. Ensayo SCB. Cálculos realizados SMA 16 5,1% BM (2)

Nº	TRABAJO (W_i)						ENERGÍA DISIPADA	
	$W_{D,i}$	W_D	$W_{\Delta Fmax,i}$	$W_{\Delta Fmax}$	$W_{\Delta R,i}$	$W_{\Delta R}$	GI_i	GI
7	10,289		4,935		5,354		2905,27	
8	8,788		4,193		4,595		2460,24	
9	7,976	9,60	4,256	5,07	3,72	4,53	2301,26	2708,08
10	9,352		4,37		4,982		2663,34	
11	9,723		5,314		4,408		2733,93	
12	11,495		7,358		4,137		3184,45	

- **SMA 16 CON 5,6% BETÚN 45/80-65**

Datos probetas

Tabla 52. Ensayo SCB. Datos probetas SMA 16 5,6% BM

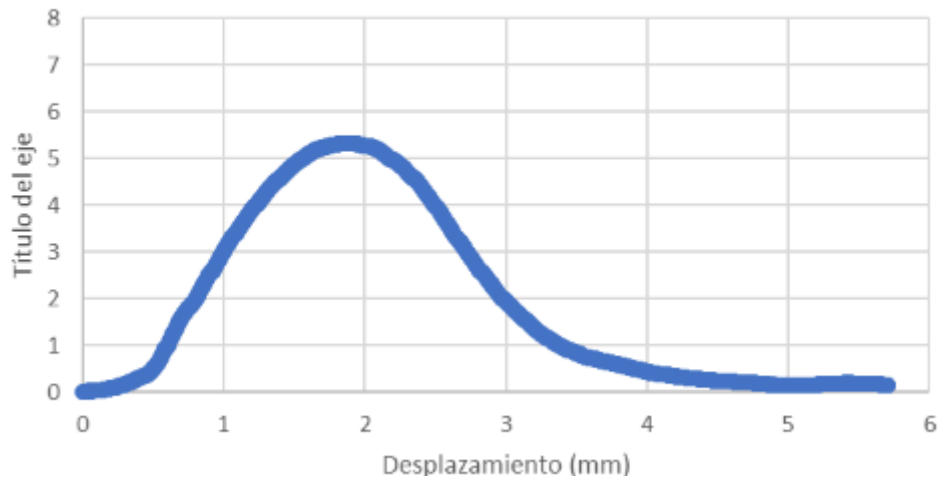
Nº	Peso aire	d_1	d_2	D	w_1	w_2	W	t_1	t_2	t_3	T	a_i	$f(a_i/w)$
13	1006,6	149,01	149,26	149,14	71,24	71,06	71,15	51,93	52,6	50,71	51,75	3,85	4,868
14	1114,7	149,82	149,36	149,59	75,17	75,96	75,57	53,7	52,94	52,04	52,89	8,05	5,007
15	1020,8	149,45	149,37	149,41	70,76	71,1	70,93	52,57	53,93	52,94	53,15	4,15	4,873
16	1095,7	149,56	150	149,78	76,11	75,71	75,91	52,15	52,61	51,54	52,10	7,80	4,990
17	1024,8	149,31	149,49	149,40	70,52	70,7	70,61	52,51	53,21	52,05	52,59	2,46	4,850
18	1114,2	149,81	149,87	149,84	75,32	75,85	75,59	52,2	53,02	51,56	52,26	6,71	4,940

Datos ensayos

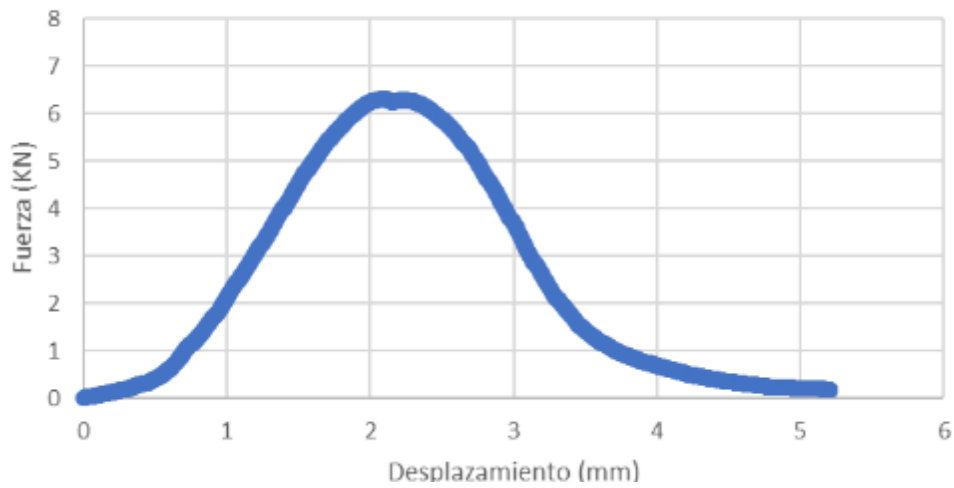
Tabla 53. Ensayo SCB. Resultados ensayo SMA 16 5,6% BM

Nº	Fmax (KN)	ΔF_{max} (mm)	1/2 Fmax (KN)	Δmdp (mm)	ΔR (mm)
13	5,33	1,92	2,67	2,8	5,7
14	6,33	2,1	3,17	3,09	5,21
15	4,87	1,59	2,44	2,48	5,32
16	5,23	1,83	2,61	2,52	4,91
17	5,67	2,01	2,83	2,91	4,94
18	6,10	2,2	3,05	2,82	5,36

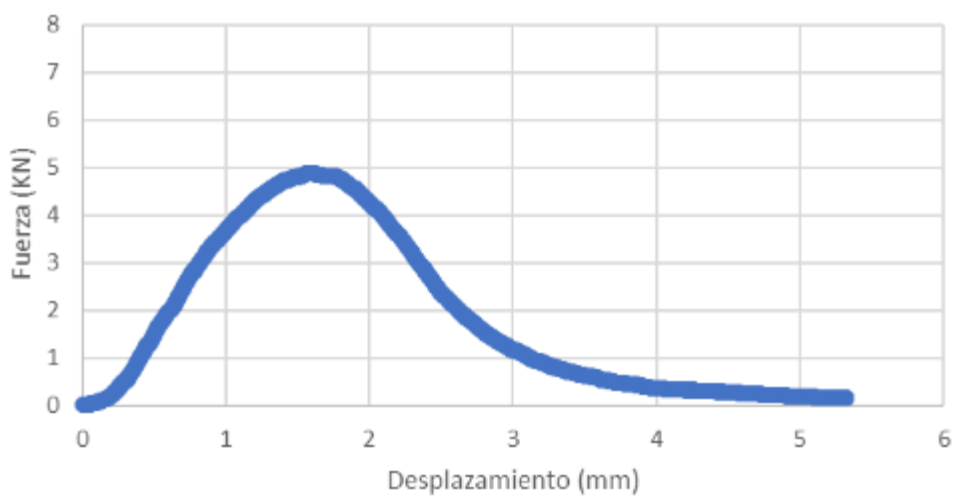
SMA 16 5,6 -13



SMA 16 5,6 -14



SMA 16 5,6 -15



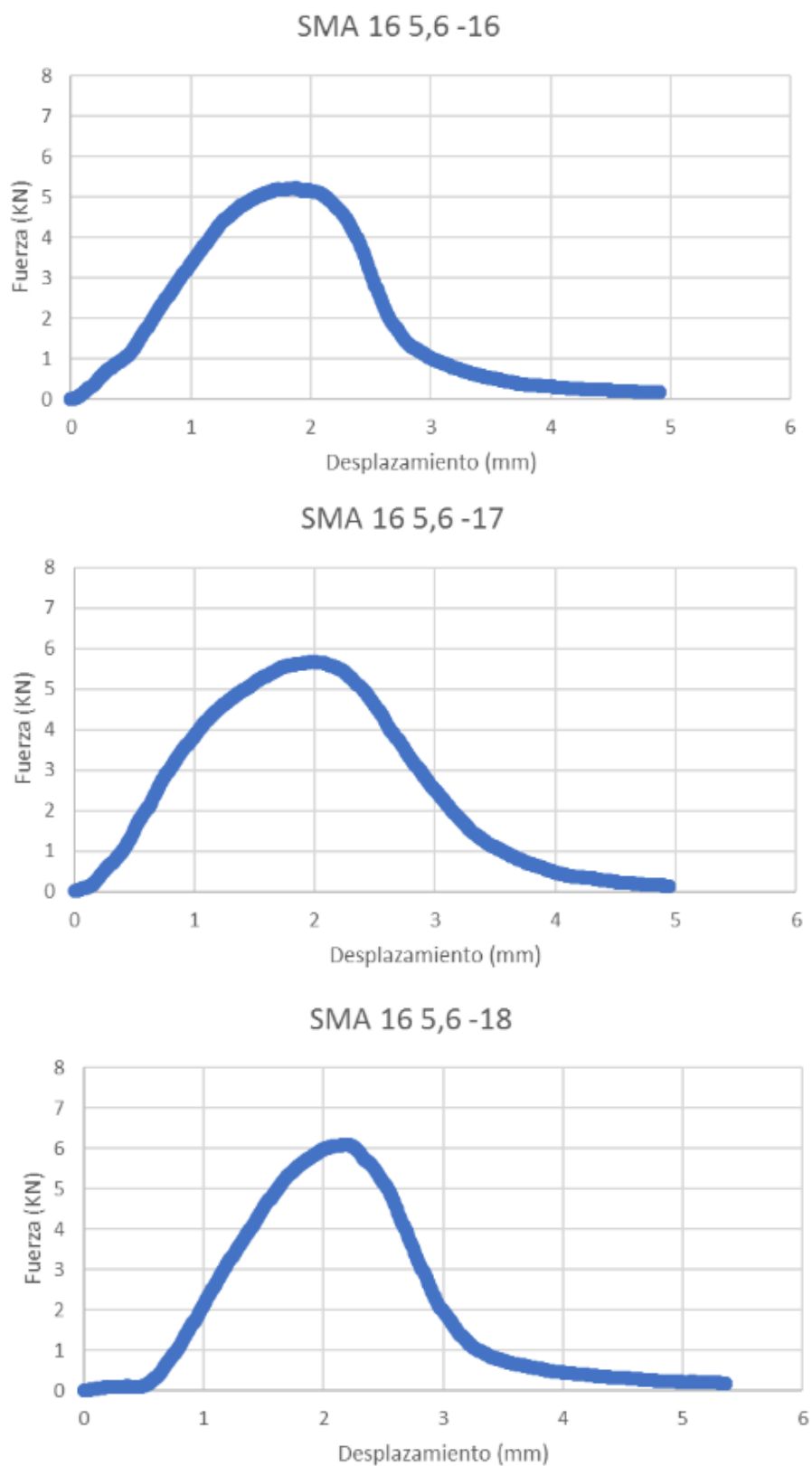


Figura 56. Gráfica fuerza-desplazamiento SMA 16 5,6% BM

Resultados obtenidos

Tabla 54. Ensayo SCB. Cálculos realizados SMA 16 5,6% BM

Nº	ε_{Fmax} (%)	σ_{max} (N/mm ²)	σ_{max} (N/mm ²)	K_i (N/mm ^{3/2})	K (N/mm ^{3/2})	Relación T/D	T/D
13	2,699	2,947		17,551		1,09	
14	2,779	3,413		20,328		1,23	
15	2,242	2,616	3,0	15,583	18,1	1,17	1,15
16	2,411	2,855		17,006		1,18	
17	2,847	3,075		18,316		1,08	
18	2,911	3,320		19,777		1,14	

Tabla 55. Ensayo SCB. Cálculos realizados SMA 16 5,6% BM

Nº	TRABAJO (W_i)						ENERGÍA DISIPADA	
	$W_{D,i}$	W_D	$W_{\Delta Fmax,i}$	$W_{\Delta Fmax}$	$W_{\Delta R,i}$	$W_{\Delta R}$	GI_i	GI
13	9,666		5,143		4,523		2775,55	
14	12,871		5,672		7,12		3604,49	
15	9,217	11,08	4,218	5,51	4,999	5,56	2596,97	3113,78
16	10,263		5,248		5,014		2892,18	
17	12,906		6,821		6,084		3601,00	
18	11,564		5,966		5,598		3212,52	

- **SMA 16 CON 6,1% BETÚN 45/80-65**

Datos probetas

Tabla 56. Ensayo SCB. Datos probetas SMA 16 6,1% BM

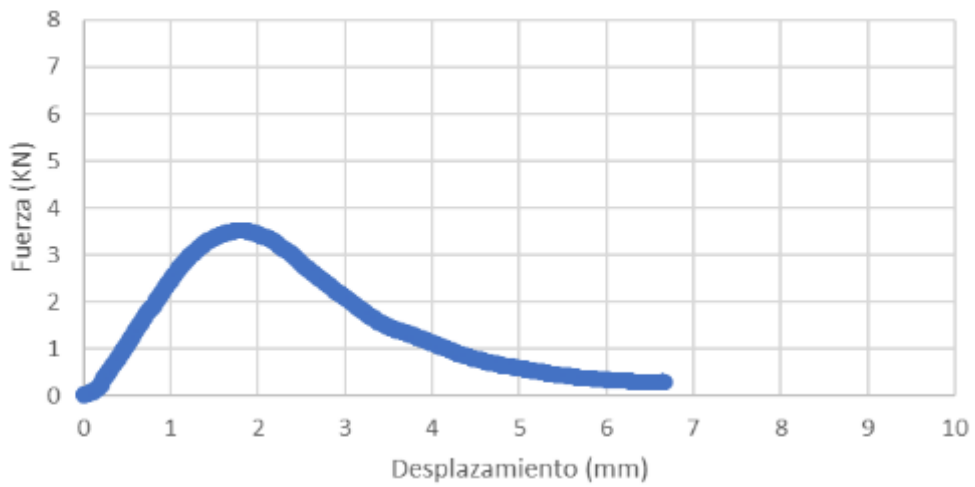
Nº	Peso aire	d_1	d_2	D	w_1	w_2	W	t_1	t_2	t_3	T	a_i	$f(a_i/w)$
19	948,4	148,44	148,24	148,34	67,81	68,96	68,39	50,82	50,66	51,22	50,90	7,15	4,998
20	1146	149,96	149,69	149,83	77,78	78,15	77,97	52,02	52,24	51,95	52,07	11,11	5,243
21	1005	149,41	148,87	149,14	72,69	72,26	72,48	49,75	49,32	49,44	49,50	3,71	4,864
22	1098,5	148,87	149,14	149,01	74,25	74,17	74,21	53,72	53,14	53,15	53,34	6,16	4,923
23	1051,3	149,76	149,47	149,62	72,74	73,87	73,31	50,75	51,58	51	51,11	4,37	4,875
24	1034,7	149,5	149,48	149,49	72,86	73,38	73,12	50,97	51,76	51,24	51,32	5,06	4,891

Datos ensayos

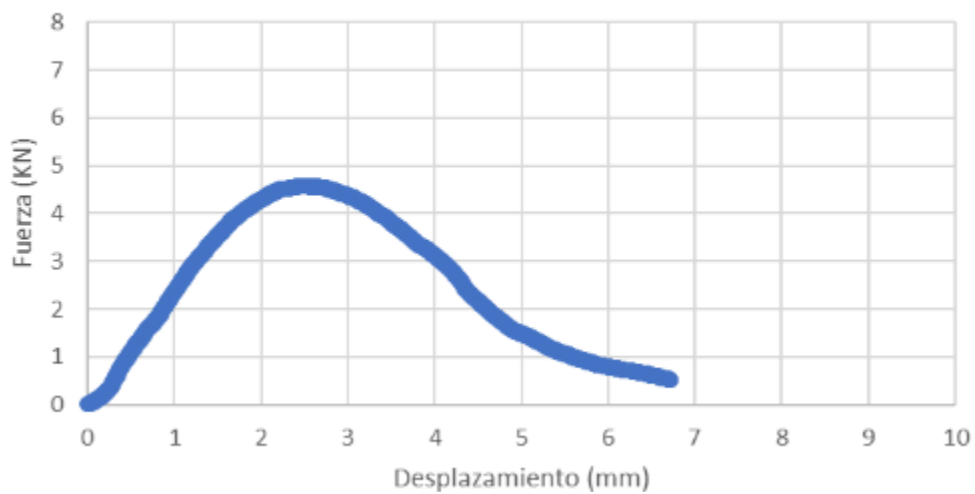
Tabla 57. Ensayo SCB. Resultados ensayo SMA 16 6,1% BM

Nº	Fmax (KN)	ΔF_{max} (mm)	1/2 Fmax (KN)	Δmdp (mm)	ΔR (mm)
19	3,52	1,81	1,76	3,23	6,67
20	4,58	2,52	2,29	4,43	6,71
21	4,51	2,58	2,25	4,3	6,71
22	5,44	2,73	2,72	4,96	9,04
23	4,72	2,84	2,36	5,66	9,86
24	4,37	2,52	2,19	4,54	8,66

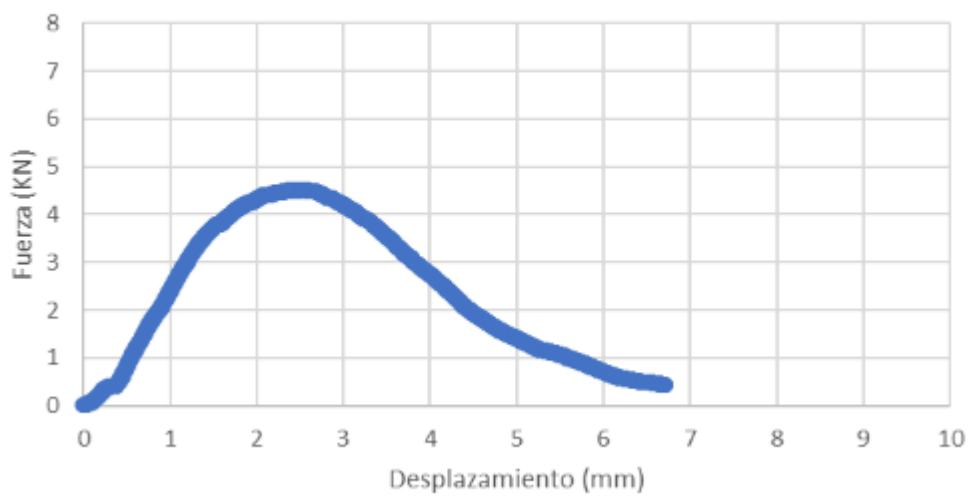
SMA 16 6,1 - 19



SMA 16 6,1 - 20



SMA 16 6,1 - 21



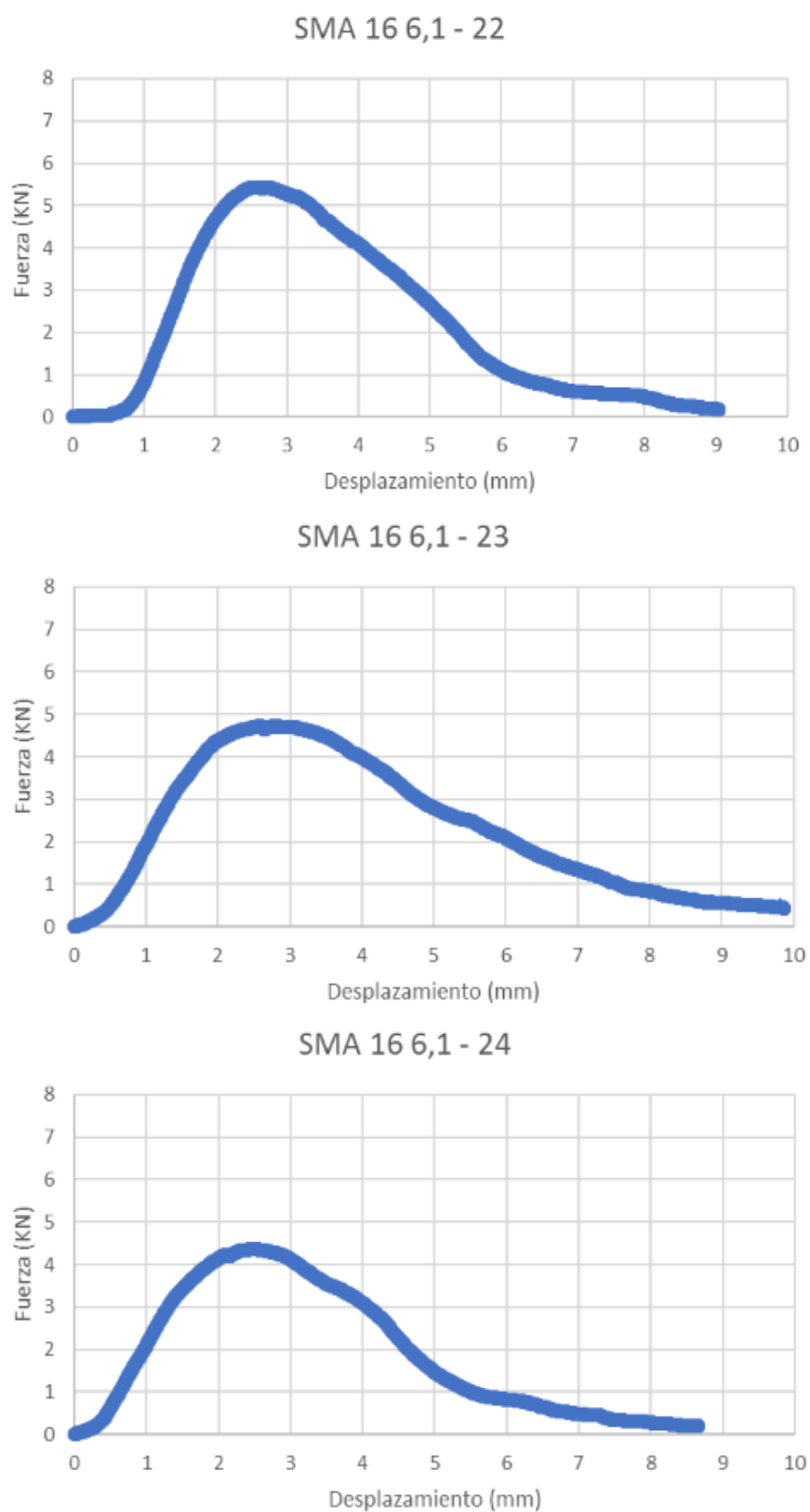


Figura 57. Gráficas fuerza-desplazamiento SMA 16 6,1% BM

Resultados obtenidos

Tabla 58. Ensayo SCB. Cálculos realizados SMA 16 6,1% BM (1)

Nº	ε_{Fmax} (%)	σ_{max} (N/mm ²)	σ_{max} (N/mm ²)	K_i (N/mm ^{3/2})	K (N/mm ^{3/2})	Relación T/D	T/D
19	2,647	1,988	2,5	11,838	15,0	0,75	0,74
20	3,232	2,502		14,904		0,77	
21	3,560	2,605		15,513		0,73	
22	3,679	2,919		17,387		0,79	
23	3,874	2,629		15,661		0,68	
24	3,446	2,430		14,473		0,71	

Tabla 59. Ensayo SCB. Cálculos realizados SMA 16 6,1% BM (2)

Nº	TRABAJO (W_i)						ENERGÍA DISIPADA	
	$W_{D,i}$	W_D	$W_{\Delta Fmax,i}$	$W_{\Delta Fmax}$	$W_{\Delta R,i}$	$W_{\Delta R}$	GI_i	GI
19	11,325	14,55	3,686	6,44	7,638	8,11	3633,76	4225,76
20	18,185		6,886		11,299		5223,47	
21	16,697		7,185		9,512		4905,33	
22	11,117		6,709		4,408		3062,91	
23	19,36		7,813		11,551		5494,50	
24	10,6		6,341		4,26		3034,58	

ANEXO 4. ENSAYO DE RIGIDEZ

1. RESUMEN DATOS MUESTRAS EMPLEADAS Y RESULTADOS OBTENIDOS.

- AC 22 CON BETÓN 35/50

Tabla 60. Ensayo de rigidez. Datos probetas AC 22

MEZCLA AC22 CON BETÓN 35/50									
Nº prob	Ø	P. aire	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med.4	MÓDULO A 0º (Mpa)	MÓDULO A 90º (Mpa)	RIGIDEZ (Mpa)
438	101,6	1174,8	58,49	58,63	59,55	58,92	7263	7384	7323
439	101,6	1175,4	58,81	59,16	60,17	60,13	6532	6422	6477
440	101,6	1176,1	58,96	59,90	59,84	59,13	6907	6571	6739
441	101,6	1172,1	59,92	59,46	59,46	60,12	6377	5844	6110
VALOR MEDIO RIGIDEZ (Mpa)									6662

Tabla 61. Ensayo de rigidez. Resultados ensayo AC 22

PROBETA 438 A 0º									
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%	
Stiffness modulus (MPa)	7854	7518	7267	7177	7051	7373	284	3,86	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	7752	7406	7170	7056	6934	7263	289,66	3,99	
Peak horizontal deformation (µm)	5,1	5,36	5,57	5,66	5,76	5,47	0,27	4,88	
Load area factor	0,58	0,58	0,58	0,57	0,57	0,58	0,00	0,44	
Peak loading force (N)	3736	3826	3844	3857	3860	3825	45,8	1,2	
Load rise time (ms)	132	130	129	129	130	129,8	1,18	0,91	
Horizontal deformation #1 (µm)	0,97	1,6	1,11	1,21	1,2	1,11	0,9	7,98	
Horizontal deformation #2 (µm)	4,3	4,3	4,46	4,45	4,56	4,36	0,18	4,21	
Seating force (N)	19	21	20	19	19	20	0,5	2,7	

PROBETA 438 A 90°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	7362	7381	7350	7513	7530	7427	77,95	1,5
Adjusted stiffness modulus (MPa)	7328	7343	7285	7462	7501	7384	83	1,12
Peak horizontal deformation (µm)	4,87	5,1	5,6	4,97	4,96	4,97	0,6	1,24
Load area factor	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,00	0,45
Peak loading force (N)	3408	3510	3534	3544	3548	3509	52	1,5
Load rise time (ms)	131	129	127	128	128	128,6	1,38	1,7
Horizontal deformation #1 (µm)	2,12	2,1	1,89	1,75	1,71	1,9	0,16	8,21
Horizontal deformation #2 (µm)	2,75	3	3,17	3,22	3,25	3,8	0,19	6,4
Seating force (N)	20	20	19	20	21	20	0,4	2

PROBETA 439 A 0°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	6934	6725	6453	6442	6360	6583	214,31	3,26
Adjusted stiffness modulus (MPa)	6877	6693	6391	6385	6312	6532	216,78	3,32
Peak horizontal deformation (µm)	5,6	5,29	5,54	5,56	5,64	5,42	0,21	3,95
Load area factor	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,00	0,44
Peak loading force (N)	3368	3420	3433	3441	3445	3421	27,9	0,8
Load rise time (ms)	131	129	129	130	127	129,1	1,3	1,1
Horizontal deformation #1 (µm)	1,29	1,35	1,41	1,39	1,4	1,37	0,4	3,28
Horizontal deformation #2 (µm)	3,77	3,94	4,12	4,17	4,24	4,5	0,17	4,24
Seating force (N)	21	20	20	20	19	20	0,4	2,1

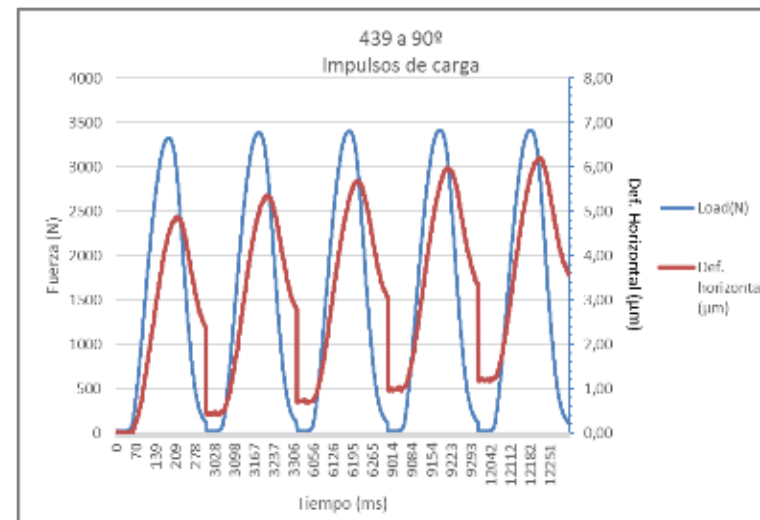
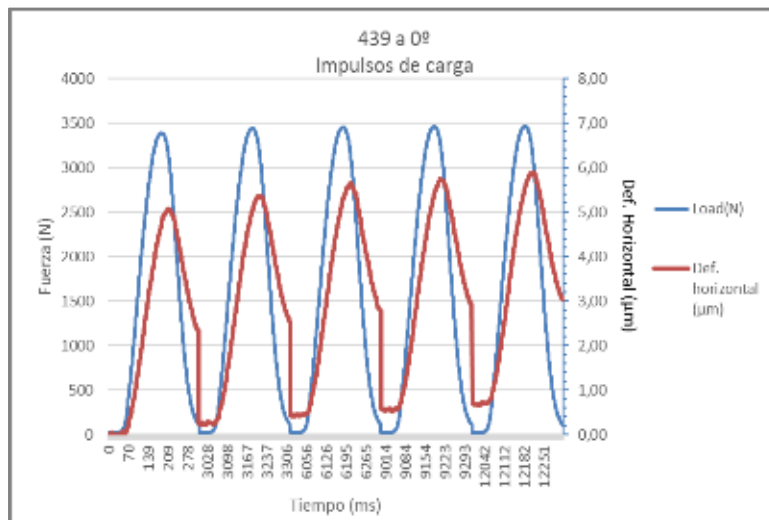
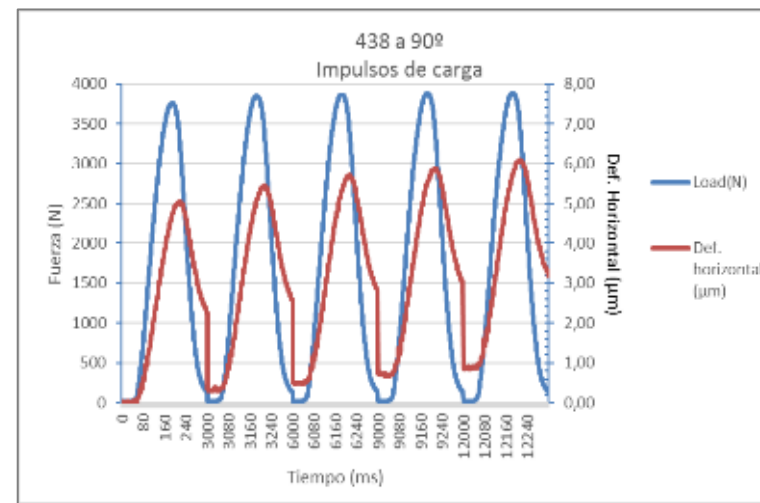
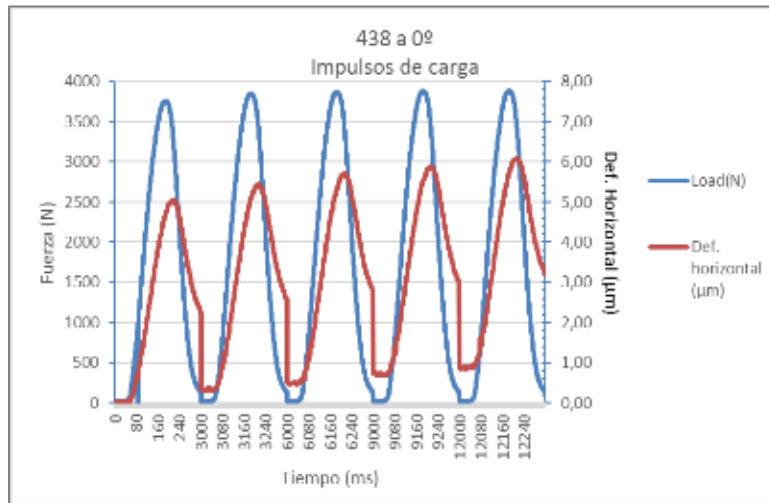
PROBETA 439 A 90°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	7120	6678	6414	6228	6112	6510	359,99	5,53
Adjusted stiffness modulus (MPa)	7026	6579	6324	6154	6028	6422	354	5,51
Peak horizontal deformation (µm)	4,83	5,25	5,49	5,67	5,78	5,41	0,34	6,27
Load area factor	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0	0,27
Peak loading force (N)	3307	3367	3386	3395	3395	3370	33,4	1
Load rise time (ms)	128	129	129	127	128	128,2	0,6	0,47
Horizontal deformation #1 (µm)	1,72	1,79	1,88	1,9	1,91	1,84	0,7	3,99
Horizontal deformation #2 (µm)	3,11	3,46	3,62	3,77	3,87	3,57	0,27	7,49
Seating force (N)	20	20	20	20	19	20	0,3	1,3

PROBETA 440 A 0°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	7398	7113	6865	6790	6659	6965	262,17	3,76
Adjusted stiffness modulus (MPa)	7330	7045	6812	6734	6612	6907	254,44	3,68
Peak horizontal deformation (µm)	4,95	5,26	5,47	5,54	5,67	5,38	0,25	4,68
Load area factor	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0	0,23
Peak loading force (N)	3511	3585	3602	3608	3618	3585	38,4	1,1
Load rise time (ms)	129	127	127	126	127	127,4	0,78	0,62
Horizontal deformation #1 (µm)	1,72	1,77	1,82	1,78	1,8	1,78	0,4	2
Horizontal deformation #2 (µm)	3,23	3,49	3,65	3,76	3,86	3,6	0,22	6,14
Seating force (N)	21	20	20	19	20	20	0,6	3

PROBETA 440 A 90°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	6833	6564	6574	6567	6621	6632	102,65	1,55
Adjusted stiffness modulus (MPa)	6778	6504	6513	6503	6558	6571	105,44	1,6
Peak horizontal deformation (µm)	4,83	5,12	5,14	5,15	5,11	5,7	0,12	2,32
Load area factor	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0	0,17
Peak loading force (N)	3168	3220	3238	3241	3242	3222	28,1	0,9
Load rise time (ms)	129	128	126	127	127	127,5	0,82	0,64
Horizontal deformation #1 (µm)	2,26	2,35	2,39	2,36	2,29	2,33	0,5	2,6
Horizontal deformation #2 (µm)	2,57	2,77	2,75	2,78	2,82	2,74	0,8	3,9
Seating force (N)	20	20	20	19	20	20	0,3	1,6

PROBETA 441 A 0°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	6827	6469	6357	6275	6227	6431	214,52	3,34
Adjusted stiffness modulus (MPa)	6777	6408	6303	6224	6172	6377	215,2	3,37
Peak horizontal deformation (µm)	4,92	5,34	5,47	5,56	5,59	5,38	0,25	4,57
Load area factor	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0	0,18
Peak loading force (N)	3239	3335	3357	3366	3359	3331	47,4	1,4
Load rise time (ms)	133	130	130	130	129	130,6	1,28	0,98
Horizontal deformation #1 (µm)	2,25	2,4	2,4	2,39	2,35	2,36	0,6	2,45
Horizontal deformation #2 (µm)	2,67	2,95	3,7	3,16	3,24	3,2	0,2	6,65
Seating force (N)	21	19	18	18	22	20	1,8	9,4

PROBETA 441 A 90°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	6341	5995	5809	5686	5604	5887	262,26	4,46
Adjusted stiffness modulus (MPa)	6281	5950	5772	5660	5557	5844	254,63	4,36
Peak horizontal deformation (μm)	4,82	5,16	5,35	5,48	5,56	5,27	0,26	5
Load area factor	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,00	0,43
Peak loading force (N)	2961	2999	3012	3019	3019	3002	21,6	0,7
Load rise time (ms)	128	128	125	126	126	127,7	1,2	0,94
Horizontal deformation #1 (μm)	2,34	2,36	2,37	2,36	2,37	2,36	0,1	0,57
Horizontal deformation #2 (μm)	2,48	2,81	2,98	3,12	3,19	2,91	0,25	8,63
Seating force (N)	20	20	21	20	20	20	0,2	1,2



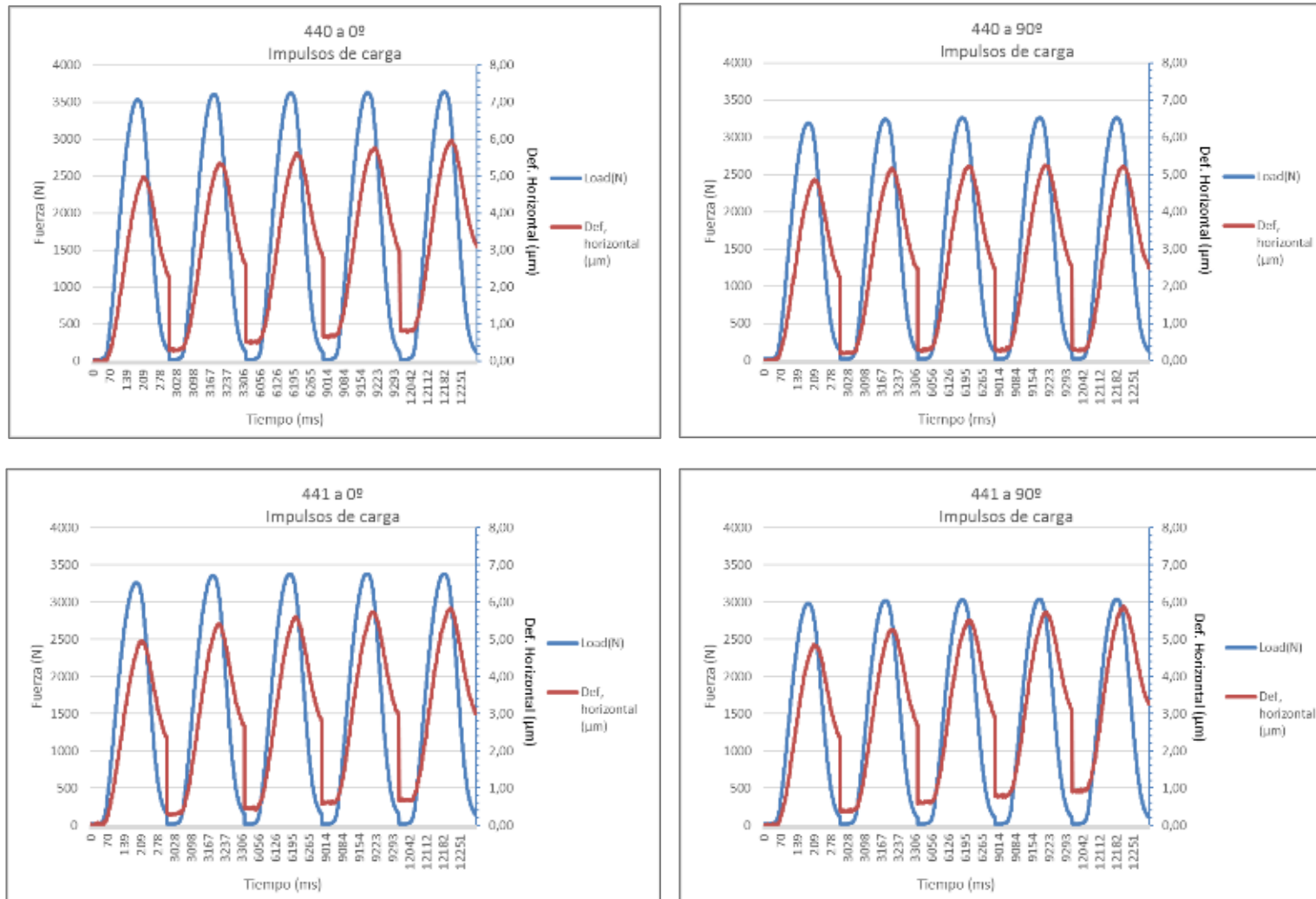


Figura 58. Gráfica impulsos de carga AC 22

- SMA 16 CON 5,1% DE BETÓN 45/80-65**

Tabla 62. Ensayo de rigidez. Datos probetas SMA 16 5,1% BM

MEZCLA SMA CON 5,1% BETÓN MODIFICADO									
Nº prob	Ø	P. aire	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med.4	MÓDULO A 0° (Mpa)	MÓDULO A 90° (Mpa)	RIGIDEZ (Mpa)
451	101,6	1164,3	62,46	62,35	62,21	62,87	3360	3326	3343
452	101,6	1180,3	62,66	62,55	62,36	62,44	3374	2843	3108
453	101,6	1180,5	63,26	63,01	62,79	62,94	3122	3007	3064
454	101,6	1176,0	63,64	63,10	62,96	63,35	2687	2510	2598
VALOR MEDIO RIGIDEZ (Mpa)									3028

Tabla 63. Ensayo de rigidez. Resultados ensayo SMA 16 5,1% BM

PROBETA 451 A 0°									
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%	
Stiffness modulus (MPa)	3465	3357	3339	3371	3396	3386	43,9	1,3	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	3443	3333	3319	3345	3363	3360	43,67	1,3	
Peak horizontal deformation (µm)	4,92	5,11	5,15	5,11	5,7	5,7	0,8	1,55	
Load area factor	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,00	0,39	
Peak loading force (N)	1719	1729	1732	1735	1736	1730	6	0,3	
Load rise time (ms)	126	124	125	127	126	125,6	1,13	0,9	
Horizontal deformation #1 (µm)	2,16	2,24	2,22	2,19	2,22	2,21	0,3	1,19	
Horizontal deformation #2 (µm)	2,76	2,87	2,93	2,92	2,85	2,87	0,6	2,15	
Seating force (N)	20	20	20	20	20	20	0,2	0,8	

PROBETA 451 A 90°									
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%	
Stiffness modulus (MPa)	3264	3253	3359	3416	3545	3367	107,32	3,19	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	3224	3214	3315	3386	3492	3326	104,28	3,14	
Peak horizontal deformation (µm)	5	5,4	4,9	4,81	4,64	4,88	0,14	2,96	
Load area factor	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0	0,62	
Peak loading force (N)	1644	1652	1657	1655	1656	1653	4,8	0,3	
Load rise time (ms)	125	125	127	124	126	125,4	1,18	0,94	
Horizontal deformation #1 (µm)	1,56	1,6	1,57	1,54	1,5	1,56	0,3	2,8	
Horizontal deformation #2 (µm)	3,44	3,44	3,33	3,26	3,13	3,32	0,11	3,44	
Seating force (N)	20	20	20	20	20	20	0,2	1,2	

PROBETA 452 A 0°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	3361	3288	3327	3393	3452	3364	55,87	1,66
Adjusted stiffness modulus (MPa)	3332	3256	3296	3371	3430	3337	60,14	1,8
Peak horizontal deformation (µm)	5	5,14	5,8	5	4,92	5,3	0,7	1,47
Load area factor	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0	0,47
Peak loading force (N)	1696	1703	1702	1710	1712	1704	5,8	0,3
Load rise time (ms)	126	124	126	126	125	125,3	0,82	0,65
Horizontal deformation #1 (µm)	2,1	1,94	1,82	1,74	1,61	1,82	0,14	7,81
Horizontal deformation #2 (µm)	3	3,19	3,26	3,26	3,31	3,2	0,11	3,42
Seating force (N)	19	20	20	20	21	20	0,4	2,1

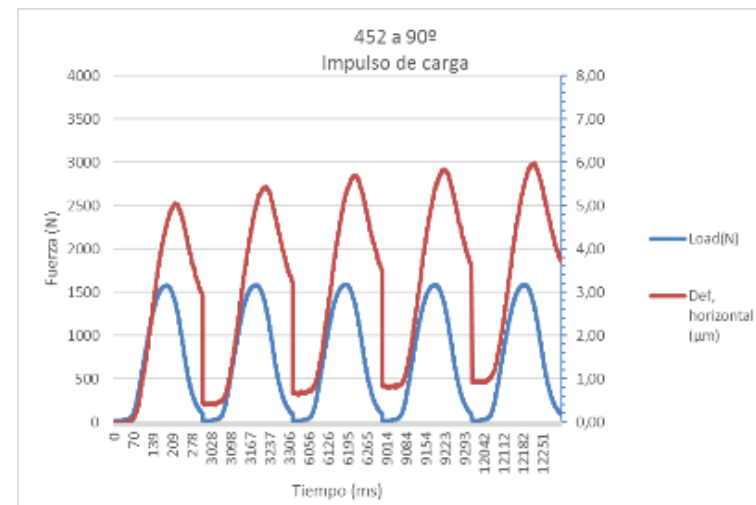
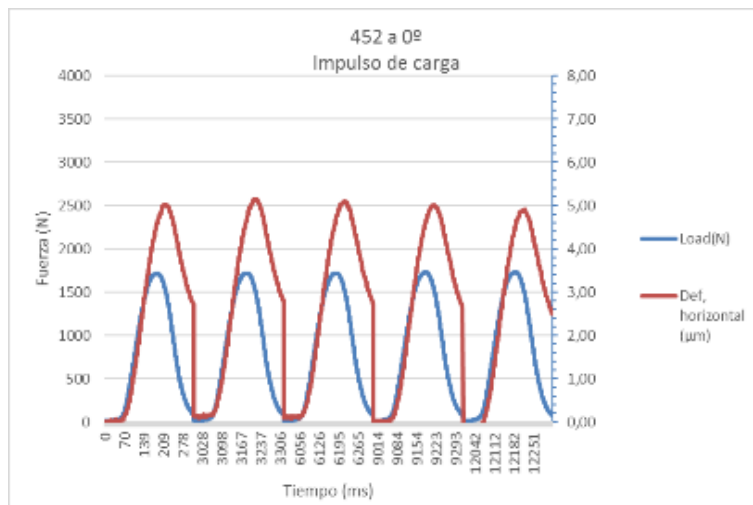
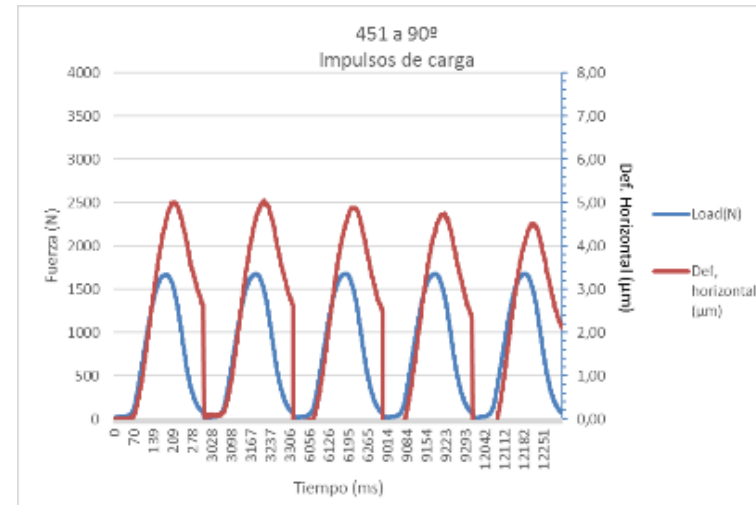
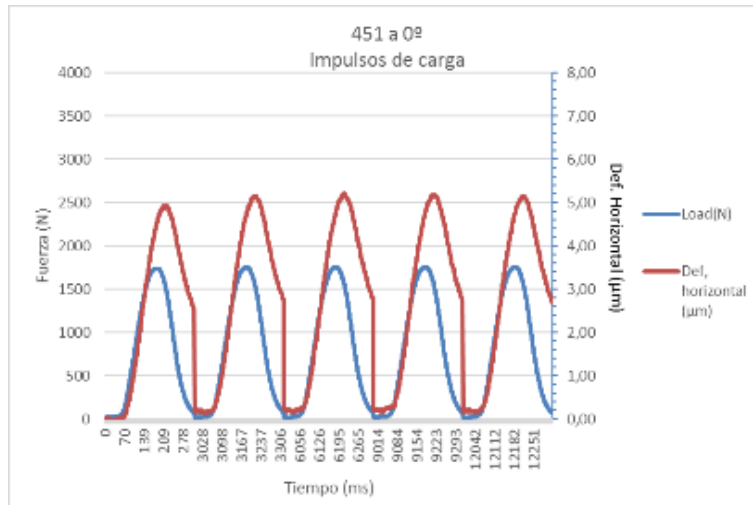
PROBETA 452 A 90°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	3085	2915	2823	2782	2760	2873	118,59	4,13
Adjusted stiffness modulus (MPa)	3055	2885	2793	2753	2735	2844	117,49	4,13
Peak horizontal deformation (µm)	5	5,32	5,51	5,58	5,63	5,41	0,23	4,22
Load area factor	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0	0,21
Peak loading force (N)	1555	1562	1567	1564	1565	1563	4	0,3
Load rise time (ms)	126	128	127	128	128	127,4	0,93	0,73
Horizontal deformation #1 (µm)	2	2,8	2,8	2,4	2,5	2,5	0,3	1,39
Horizontal deformation #2 (µm)	3,24	3,43	3,53	3,58	3,58	3,36	0,21	6,32
Seating force (N)	20	19	20	20	19	20	0,2	0,9

PROBETA 453 A 0°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	3147	3100	3135	3171	3209	3152	36,45	1,16
Adjusted stiffness modulus (MPa)	3104	3062	3102	3160	3181	3122	42,91	1,37
Peak horizontal deformation (µm)	4,96	5,8	5,5	5,1	4,96	5,1	0,5	0,97
Load area factor	0,57	0,58	0,58	0,59	0,58	0,58	0,1	1,14
Peak loading force (N)	1585	1601	1608	1613	1617	1605	11,6	0,7
Load rise time (ms)	125	123	126	126	126	125,4	1,28	1,2
Horizontal deformation #1 (µm)	2,52	2,48	2,46	2,45	2,38	2,46	0,4	1,81
Horizontal deformation #2 (µm)	2,44	2,6	2,59	2,56	2,58	2,55	0,6	2,31
Seating force (N)	20	20	20	20	20	20	0,2	0,9

PROBETA 453 A 90°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	3178	3021	2975	2979	2983	3027	77,14	2,55
Adjusted stiffness modulus (MPa)	3144	3002	2957	2964	2969	3007	70,11	2,33
Peak horizontal deformation (µm)	5,5	5,34	5,43	5,43	5,42	5,33	0,15	2,74
Load area factor	0,58	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0	0,66
Peak loading force (N)	1630	1639	1642	1642	1643	1640	4,8	0,3
Load rise time (ms)	125	126	127	126	126	125,9	0,82	0,65
Horizontal deformation #1 (µm)	0,85	0,86	0,85	0,8	0,78	0,83	0,3	3,93
Horizontal deformation #2 (µm)	4,2	4,48	4,59	4,63	4,64	4,51	0,16	3,61
Seating force (N)	20	20	20	20	20	20	0,2	0,8

PROBETA 454 A 0°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	2850	2722	2666	2657	2636	2706	77,28	2,86
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2832	2705	2642	2636	2619	2687	78,37	2,92
Peak horizontal deformation (µm)	5,7	5,32	5,46	5,47	5,52	5,37	0,16	3,7
Load area factor	0,59	0,59	0,58	0,58	0,59	0,59	0	0,4
Peak loading force (N)	1473	1479	1485	1483	1484	1481	4,6	0,3
Load rise time (ms)	126	125	125	126	126	125,4	0,6	0,48
Horizontal deformation #1 (µm)	0,76	0,65	0,53	0,39	0,32	0,53	0,16	3,62
Horizontal deformation #2 (µm)	4,31	4,67	4,93	5,8	5,2	4,84	0,32	6,59
Seating force (N)	20	20	20	20	20	20	0,1	0,7

PROBETA 454 A 90°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	2768	2573	2496	2422	2376	2527	137,93	5,46
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2750	2560	2482	2400	2357	2510	138,91	5,53
Peak horizontal deformation (µm)	5,13	5,55	5,73	5,91	6,3	5,67	0,32	5,57
Load area factor	0,59	0,59	0,59	0,58	0,58	0,59	0	0,53
Peak loading force (N)	1448	1457	1459	1460	1462	1457	4,8	0,3
Load rise time (ms)	128	126	128	126	127	126,9	1,9	0,86
Horizontal deformation #1 (µm)	1,41	1,44	1,44	1,41	1,39	1,42	0,2	1,38
Horizontal deformation #2 (µm)	3,72	4,1	4,29	4,5	4,64	4,25	0,32	7,57
Seating force (N)	20	20	20	20	20	20	0,1	0,6



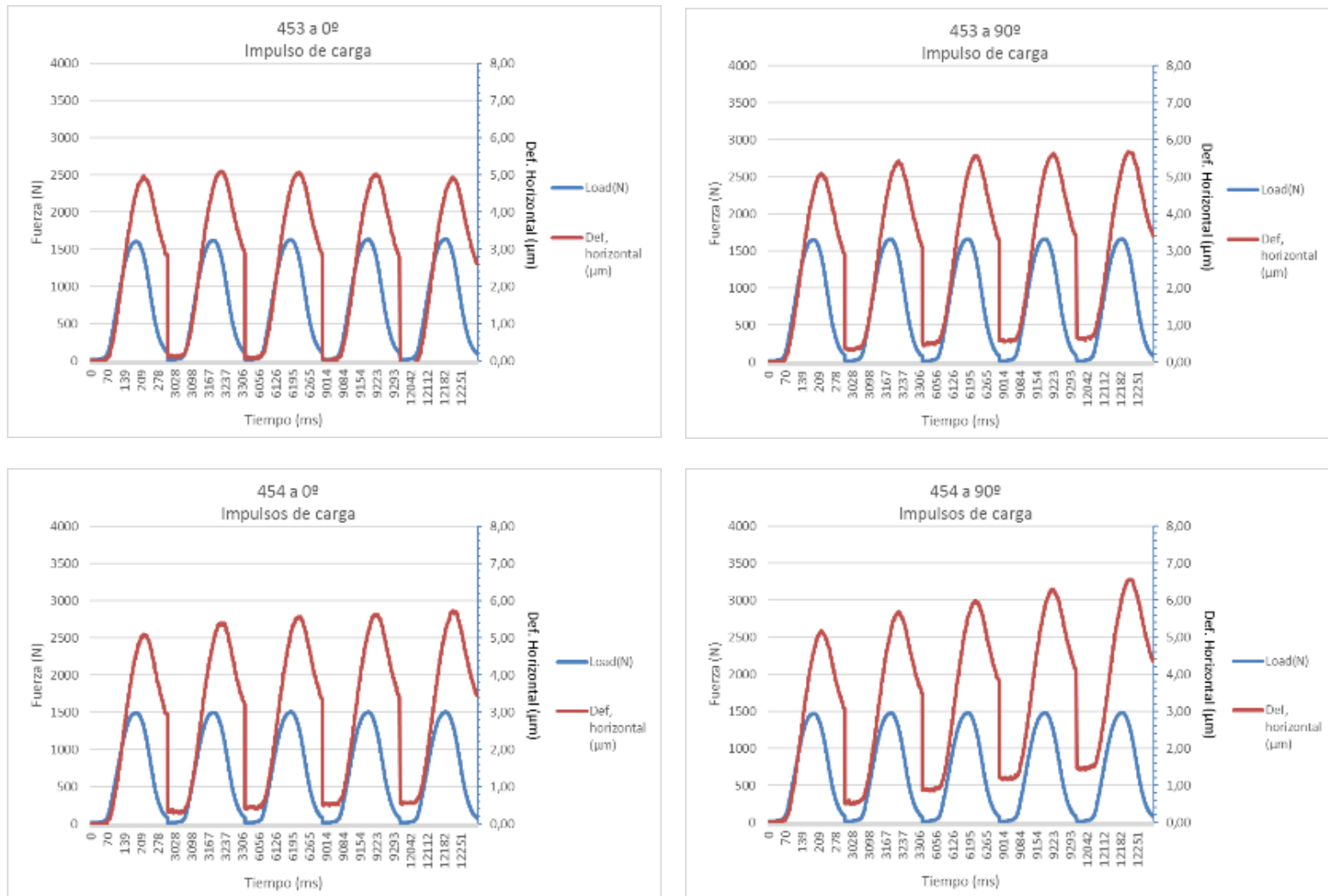


Figura 59. Gráficas impulsos de carga SMA 16 5,1% BM

- SMA 16 CON 5,6% DE BETÓN 45/80-65**

Tabla 64. Ensayo de rigidez. Datos probetas SMA 16 5,6% BM

MEZCLA SMA CON 5,6% BETÓN MODIFICADO									
Nº prob	Ø	P. aire	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med.4	MÓDULO A 0° (Mpa)	MÓDULO A 90° (Mpa)	RIGIDEZ (Mpa)
495	101,6	1168,4	61,83	62,13	62,21	62,07	2933	2720	2827
496	101,6	1162,8	62,18	61,96	61,94	62,20	2653	2466	2560
497	101,6	1169,7	62,49	62,46	62,70	62,63	2507	2254	2381
498	101,6	1169,4	62,55	62,78	62,86	62,35	2564	2399	2482
VALOR MEDIO RIGIDEZ (Mpa)									2562

Tabla 65. Ensayo de rigidez. Resultados ensayo SMA 16 5,6% BM

PROBETA 495 A 0°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	2999	2915	2919	2957	2975	2953	32,2	1,9
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2973	2892	2900	2945	2957	2933	32	1,9
Peak horizontal deformation (µm)	4,92	5,9	5,8	5,2	4,99	5,2	0,6	1,29
Load area factor	0,58	0,58	0,59	0,59	0,59	0,59	0	0,48
Peak loading force (N)	1476	1486	1485	1487	1485	1484	4	0,3
Load rise time (ms)	126	126	126	125	125	125,6	0,72	0,57
Horizontal deformation #1 (µm)	1,82	1,97	2,2	2,4	2,7	1,99	0,9	4,47
Horizontal deformation #2 (µm)	3,1	3,12	3,6	2,98	2,91	3,3	0,8	2,51
Seating force (N)	20	20	21	21	21	21	0,6	2,9

PROBETA 495 A 90°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	2934	2741	2691	2658	2637	2732	106,89	3,91
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2917	2740	2675	2647	2620	2720	106,12	3,9
Peak horizontal deformation (µm)	4,93	5,28	5,41	5,5	5,53	5,33	0,22	4,6
Load area factor	0,59	0,6	0,59	0,59	0,59	0,59	0	0,7
Peak loading force (N)	1449	1448	1457	1464	1460	1456	5,9	0,4
Load rise time (ms)	126	127	126	126	125	125,9	0,82	0,65
Horizontal deformation #1 (µm)	0,36	0,34	0,3	0,26	0,23	0,3	0,5	16,38
Horizontal deformation #2 (µm)	4,58	4,94	5,11	5,24	5,3	5,3	0,26	5,18
Seating force (N)	18	22	22	18	19	20	1,6	8,3

PROBETA 496 A 0º								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	2807	2684	2644	2620	2613	2674	71,5	2,66
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2788	2664	2619	2605	2588	2653	72,9	2,72
Peak horizontal deformation (µm)	4,9	5,16	5,24	5,29	5,32	5,18	0,15	2,87
Load area factor	0,59	0,58	0,58	0,59	0,58	0,58	0	0,48
Peak loading force (N)	1378	1387	1387	1388	1391	1386	4,2	0,3
Load rise time (ms)	125	126	126	125	126	125,4	0,6	0,48
Horizontal deformation #1 (µm)	1,84	1,81	1,74	1,67	1,62	1,74	0,8	4,71
Horizontal deformation #2 (µm)	3,7	3,35	3,5	3,62	3,69	3,45	0,22	6,48
Seating force (N)	20	20	20	20	21	20	0,3	1,3

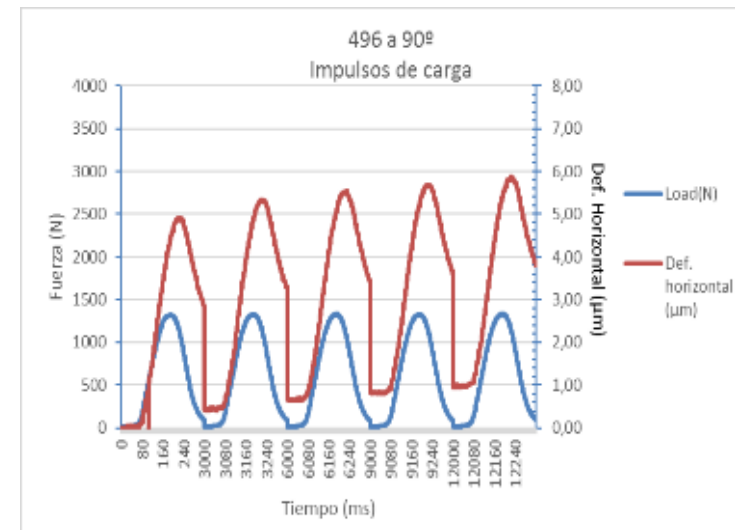
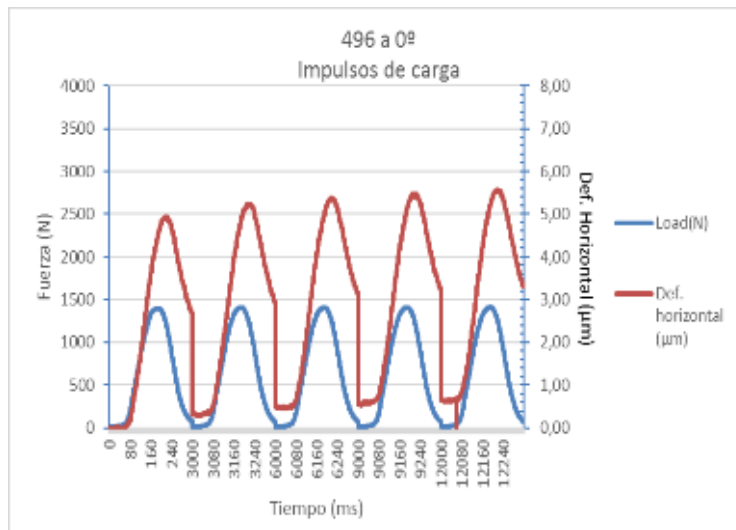
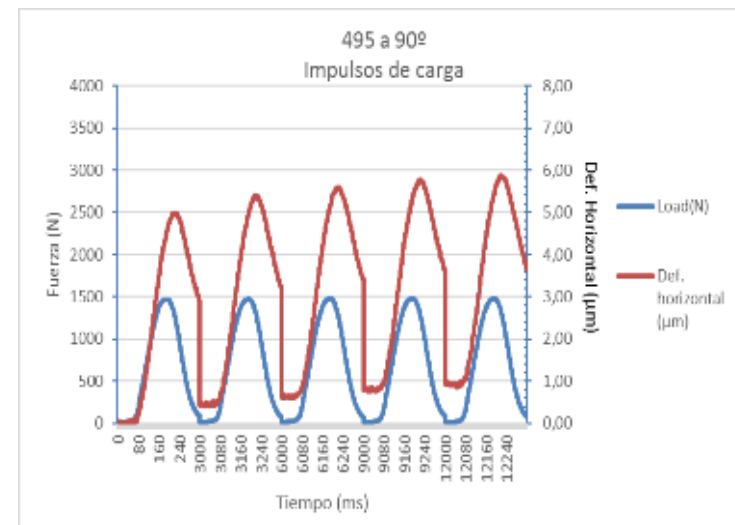
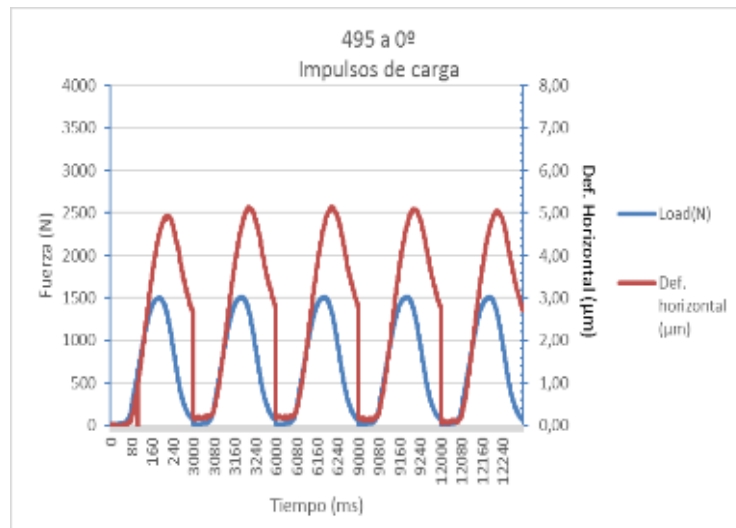
PROBETA 496 A 90º								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	2665	2497	2448	2408	2374	2478	101,69	4,1
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2654	2480	2424	2405	2365	2466	101,22	4,11
Peak horizontal deformation (µm)	4,87	5,23	5,35	5,41	5,51	5,27	0,22	4,24
Load area factor	0,59	0,59	0,58	0,6	0,58	0,58	0,1	0,92
Peak loading force (N)	1298	1306	1311	1305	1310	1306	4,5	0,3
Load rise time (ms)	126	126	126	126	126	125,9	0,39	0,31
Horizontal deformation #1 (µm)	2,9	2,16	2,15	2,13	2,14	2,13	0,3	1,22
Horizontal deformation #2 (µm)	2,78	3,7	3,2	3,29	3,37	3,14	0,21	6,58
Seating force (N)	20	20	19	21	21	20	0,9	4,3

PROBETA 497 A 0º								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	2807	2684	2644	2620	2613	2674	71,5	2,66
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2788	2664	2619	2605	2588	2653	72,9	2,72
Peak horizontal deformation (µm)	4,9	5,16	5,24	5,29	5,32	5,18	0,15	2,87
Load area factor	0,59	0,58	0,58	0,59	0,58	0,58	0	0,48
Peak loading force (N)	1378	1387	1387	1388	1391	1386	4,2	0,3
Load rise time (ms)	125	126	126	125	126	125,4	0,6	0,48
Horizontal deformation #1 (µm)	1,84	1,81	1,74	1,67	1,62	1,74	0,8	4,71
Horizontal deformation #2 (µm)	3,7	3,35	3,5	3,62	3,69	3,45	0,22	6,48
Seating force (N)	20	20	20	20	21	20	0,3	1,3

PROBETA 497 A 90°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	2665	2497	2448	2408	2374	2478	101,69	4,1
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2654	2480	2424	2405	2365	2466	101,22	4,11
Peak horizontal deformation (μm)	4,87	5,23	5,35	5,41	5,51	5,27	0,22	4,24
Load area factor	0,59	0,59	0,58	0,6	0,59	0,59	0,1	0,92
Peak loading force (N)	1298	1306	1311	1305	1310	1306	4,5	0,3
Load rise time (ms)	126	126	126	126	126	125,9	0,39	0,31
Horizontal deformation #1 (μm)	2,9	2,16	2,15	2,13	2,14	2,13	0,3	1,22
Horizontal deformation #2 (μm)	2,78	3,7	3,2	3,29	3,37	3,14	0,21	6,58
Seating force (N)	20	20	19	21	21	20	0,9	4,3

PROBETA 498 A 0°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	2835	2639	2519	2468	2440	2580	144,5	5,6
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2822	2613	2505	2455	2425	2564	143,83	5,61
Peak horizontal deformation (μm)	5,13	5,55	5,83	5,97	6,4	5,7	0,33	5,8
Load area factor	0,59	0,58	0,59	0,59	0,59	0,59	0	0,61
Peak loading force (N)	1470	1479	1483	1488	1488	1482	6,7	0,5
Load rise time (ms)	125	123	124	124	127	124,6	1,38	1,1
Horizontal deformation #1 (μm)	2,16	2,38	2,58	2,72	2,78	2,52	0,23	9,12
Horizontal deformation #2 (μm)	2,98	3,16	3,25	3,24	3,26	3,18	0,11	3,32
Seating force (N)	20	20	20	20	19	20	0,3	1,6

PROBETA 498 A 90°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	2587	2449	2392	2360	2329	2423	90,97	3,75
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2573	2424	2363	2334	2303	2399	95,64	3,99
Peak horizontal deformation (μm)	5,2	5,3	5,46	5,53	5,61	5,38	0,21	3,88
Load area factor	0,59	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0	0,84
Peak loading force (N)	1311	1311	1318	1318	1319	1315	3,7	0,3
Load rise time (ms)	126	126	129	128	126	126,7	1,39	1,1
Horizontal deformation #1 (μm)	1,12	1,21	1,22	1,21	1,25	1,2	0,4	3,55
Horizontal deformation #2 (μm)	3,89	4,8	4,24	4,32	4,36	4,18	0,17	4,8
Seating force (N)	20	21	19	20	20	20	0,4	2,2



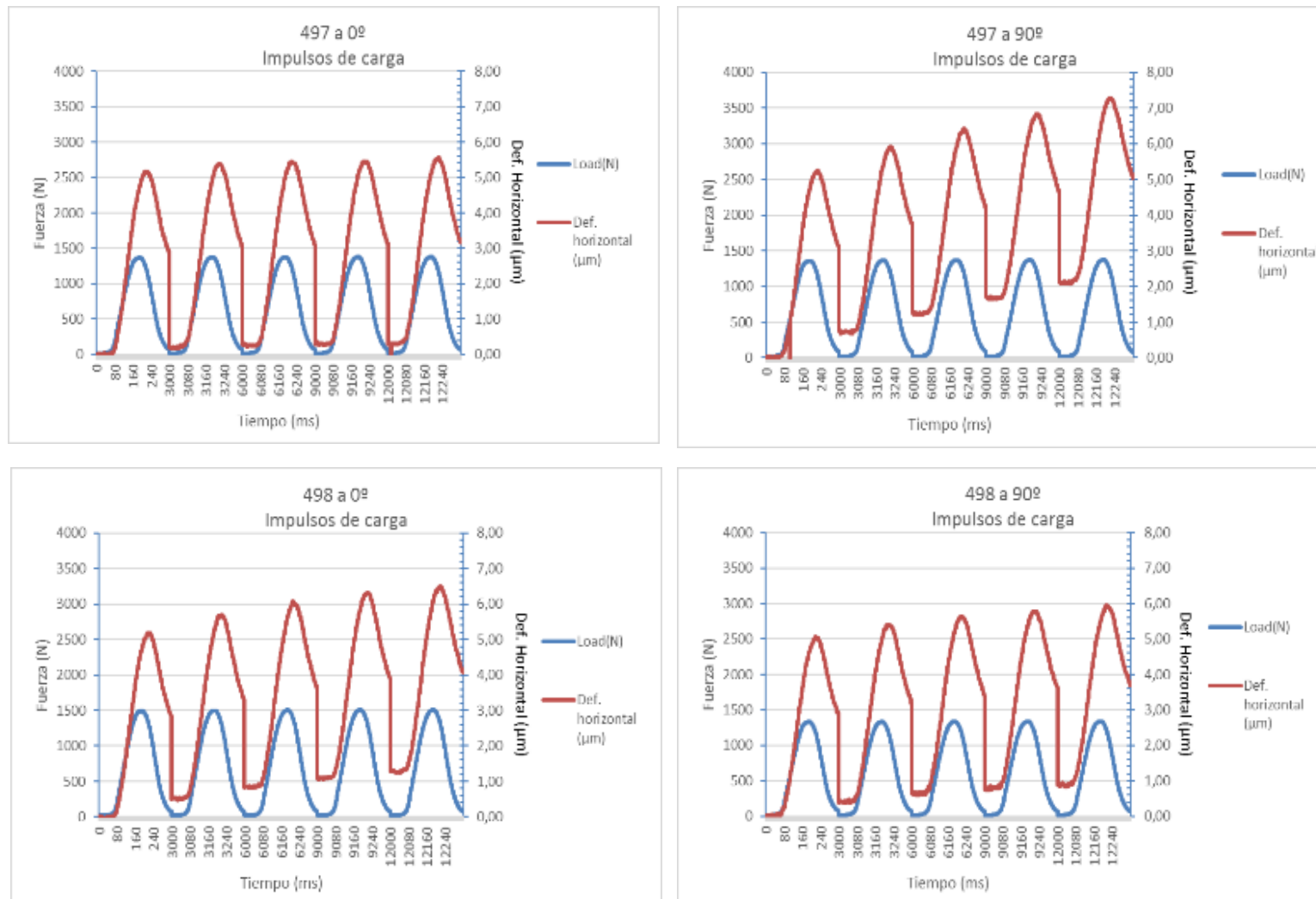


Figura 60. Gráficas impulsos de carga SMA 16 5,6% BM

- SMA 16 CON 6,1% DE BETÓN 45/80-65**

Tabla 66. Ensayo de rigidez. Datos probetas SMA 6,1% BM

MEZCLA SMA CON 6,1% BETÓN MODIFICADO									
Nº prob	Ø	P. aire	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med.4	MÓDULO A 0° (Mpa)	MÓDULO A 90° (Mpa)	RIGIDEZ (Mpa)
470	101,6	1161,0	61,40	61,70	61,85	61,51	2256	2352	2304
471	101,6	1163,2	62,87	62,83	62,45	62,34	2262	2165	2214
472	101,6	1176,6	62,67	62,67	62,50	62,72	2458	2358	2408
473	101,6	1171,1	61,82	61,74	61,57	61,44	2152	2022	2087
VALOR MEDIO RIGIDEZ (Mpa)									2253

Tabla 67. Ensayo de rigidez. Resultados ensayo SMA 16 6,1% BM

PROBETA 470 A 0°									
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%	
Stiffness modulus (MPa)	2550	2331	2212	2140	2091	2265	163,86	7,23	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2543	2325	2202	2126	2086	2256	164,79	7,3	
Peak horizontal deformation (µm)	5,2	5,56	5,84	6,5	6,2	5,73	0,42	7,3	
Load area factor	0,59	0,59	0,59	0,59	0,6	0,59	0	0,55	
Peak loading force (N)	1271	1288	1283	1287	1288	1284	6,5	0,5	
Load rise time (ms)	126	127	124	126	126	125,6	1,1	0,81	
Horizontal deformation #1 (µm)	2,7	2,43	2,64	2,83	2,91	2,57	0,3	11,8	
Horizontal deformation #2 (µm)	2,95	3,13	3,2	3,22	3,29	3,16	0,12	3,7	
Seating force (N)	23	19	23	24	23	22	1,7	7,5	

PROBETA 470 A 90°									
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%	
Stiffness modulus (MPa)	2550	2331	2212	2140	2091	2265	163,86	7,23	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2543	2325	2202	2126	2086	2256	164,79	7,3	
Peak horizontal deformation (µm)	5,2	5,56	5,84	6,5	6,2	5,73	0,42	7,3	
Load area factor	0,59	0,59	0,59	0,59	0,6	0,59	0	0,55	
Peak loading force (N)	1271	1288	1283	1287	1288	1284	6,5	0,5	
Load rise time (ms)	126	127	124	126	126	125,6	1,1	0,81	
Horizontal deformation #1 (µm)	2,7	2,43	2,64	2,83	2,91	2,57	0,3	11,8	
Horizontal deformation #2 (µm)	2,95	3,13	3,2	3,22	3,29	3,16	0,12	3,7	
Seating force (N)	23	19	23	24	23	22	1,7	7,5	

PROBETA 471 A 0°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	2369	2264	2238	2234	2242	2269	50,63	2,23
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2359	2255	2230	2235	2230	2262	49,28	2,18
Peak horizontal deformation (µm)	4,95	5,16	5,24	5,25	5,26	5,17	0,12	2,26
Load area factor	0,59	0,59	0,59	0,6	0,59	0,59	0	0,72
Peak loading force (N)	1184	1179	1185	1185	1190	1185	3,5	0,3
Load rise time (ms)	123	122	120	125	123	122,7	1,57	1,28
Horizontal deformation #1 (µm)	2,87	2,94	2,97	2,96	2,94	2,93	0,4	1,2
Horizontal deformation #2 (µm)	2,8	2,22	2,27	2,29	2,32	2,24	0,8	3,75
Seating force (N)	19	22	22	22	23	22	1,5	6,9

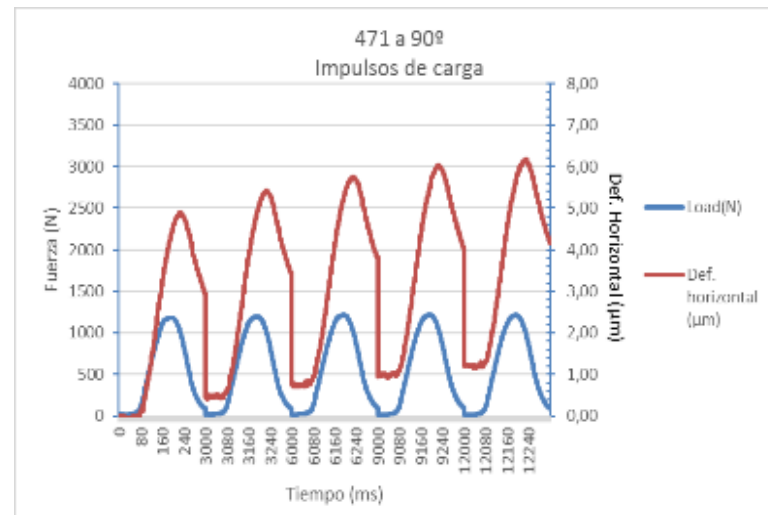
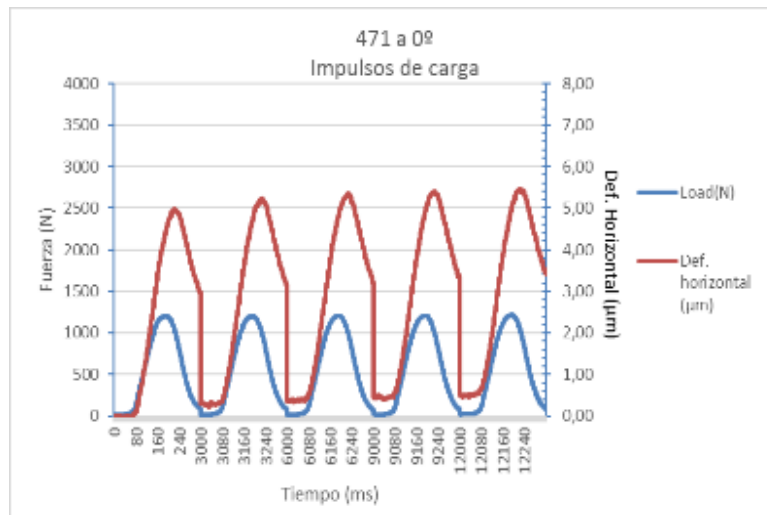
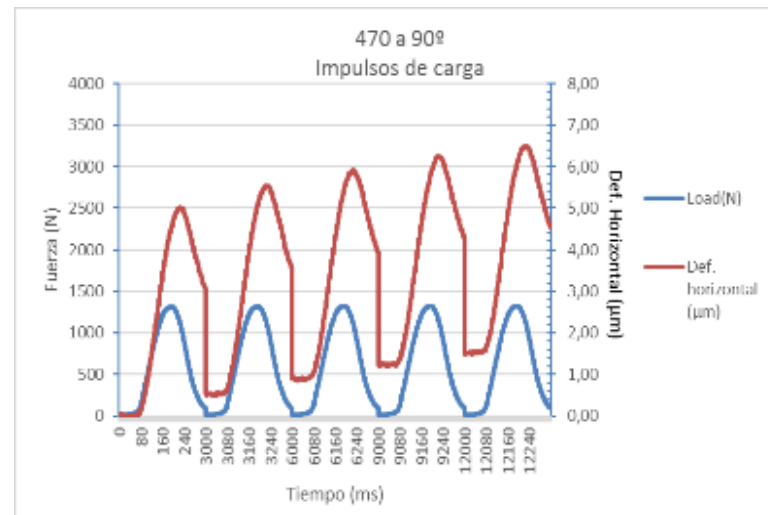
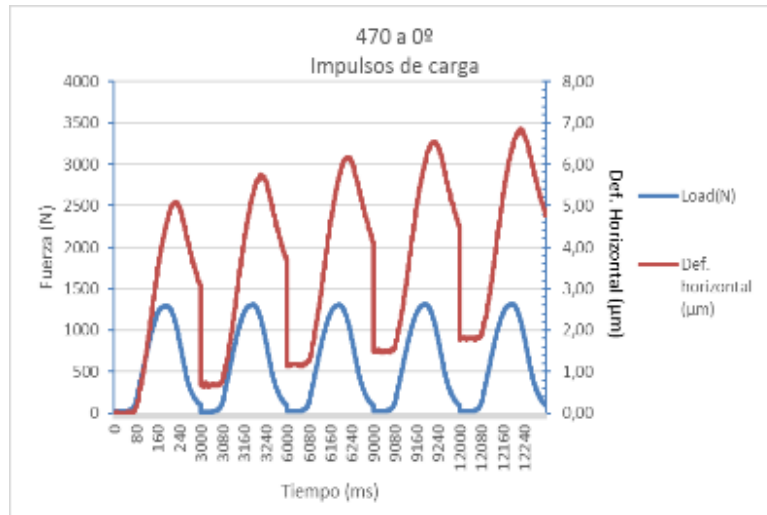
PROBETA 471 A 90°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	2379	2197	2141	2084	2063	2173	113,15	5,21
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2375	2197	2131	2070	2052	2165	116,7	5,39
Peak horizontal deformation (µm)	4,84	5,29	5,53	5,7	5,74	5,42	0,33	6,7
Load area factor	0,6	0,6	0,59	0,59	0,59	0,59	0,1	0,91
Peak loading force (N)	1164	1174	1195	1200	1196	1186	14,3	1,2
Load rise time (ms)	123	124	128	126	125	125,1	1,65	1,32
Horizontal deformation #1 (µm)	2,25	2,34	2,35	2,32	2,27	2,3	0,4	1,7
Horizontal deformation #2 (µm)	2,59	2,96	3,18	3,39	3,47	3,12	0,32	10,18
Seating force (N)	22	22	19	17	17	19	1,4	12,1

PROBETA 472 A 0°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	2680	2508	2433	2418	2384	2485	105,59	4,25
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2653	2474	2410	2396	2358	2458	104,21	4,24
Peak horizontal deformation (µm)	4,9	5,26	5,39	5,44	5,53	5,3	0,22	4,17
Load area factor	0,58	0,57	0,58	0,58	0,58	0,58	0	0,52
Peak loading force (N)	1326	1333	1324	1330	1331	1329	3,4	0,3
Load rise time (ms)	125	127	126	128	126	126,2	1,18	0,93
Horizontal deformation #1 (µm)	2,16	2,24	2,12	2,5	2	2,11	0,8	3,92
Horizontal deformation #2 (µm)	2,74	3,2	3,27	3,39	3,53	3,19	0,28	8,8
Seating force (N)	19	18	22	20	22	20	1,6	8,1

PROBETA 472 A 90°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	2624	2380	2312	2265	2239	2364	138,6	5,86
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2612	2371	2308	2262	2237	2358	135,6	5,73
Peak horizontal deformation (µm)	5,3	5,54	5,73	5,85	5,95	5,62	0,32	5,78
Load area factor	0,59	0,59	0,6	0,6	0,6	0,6	0	0,48
Peak loading force (N)	1328	1327	1332	1333	1341	1332	4,9	0,4
Load rise time (ms)	123	123	123	122	126	123,7	1,39	1,13
Horizontal deformation #1 (µm)	1,52	1,29	1,6	0,95	0,88	1,14	0,24	20,77
Horizontal deformation #2 (µm)	3,51	4,25	4,67	4,89	5,7	4,48	0,56	12,48
Seating force (N)	20	23	20	23	22	21	1,2	5,7

PROBETA 473 A 0°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	2426	2224	2121	2060	2022	2171	144,77	6,67
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2403	2206	2106	2039	2005	2152	143,2	6,65
Peak horizontal deformation (µm)	4,94	5,42	5,71	5,87	5,99	5,59	0,38	6,73
Load area factor	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0	0,35
Peak loading force (N)	1191	1199	1204	1203	1204	1200	5	0,4
Load rise time (ms)	126	126	128	129	129	127,5	1,3	1,2
Horizontal deformation #1 (µm)	2,3	2,11	2,14	2,11	2,7	2,9	0,4	1,81
Horizontal deformation #2 (µm)	2,91	3,31	3,57	3,76	3,92	3,49	0,36	10,22
Seating force (N)	19	19	19	20	20	19	0,5	2,4

PROBETA 473 A 90°								
Pulse	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	Mean	SD	CV%
Stiffness modulus (MPa)	2131	2060	2042	2031	2028	2058	37,85	1,84
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2089	2027	2009	1987	1998	2022	35,94	1,78
Peak horizontal deformation (µm)	4,99	5,17	5,24	5,3	5,29	5,2	0,11	2,15
Load area factor	0,56	0,57	0,57	0,55	0,57	0,56	0,1	0,99
Peak loading force (N)	1058	1059	1064	1070	1066	1063	4,5	0,4
Load rise time (ms)	127	128	126	129	128	127,7	0,82	0,64
Horizontal deformation #1 (µm)	0,95	0,79	0,7	0,58	0,52	0,71	0,15	21,45
Horizontal deformation #2 (µm)	4,5	4,38	4,54	4,71	4,77	4,49	0,26	5,8
Seating force (N)	19	20	18	18	18	19	0,8	4,4



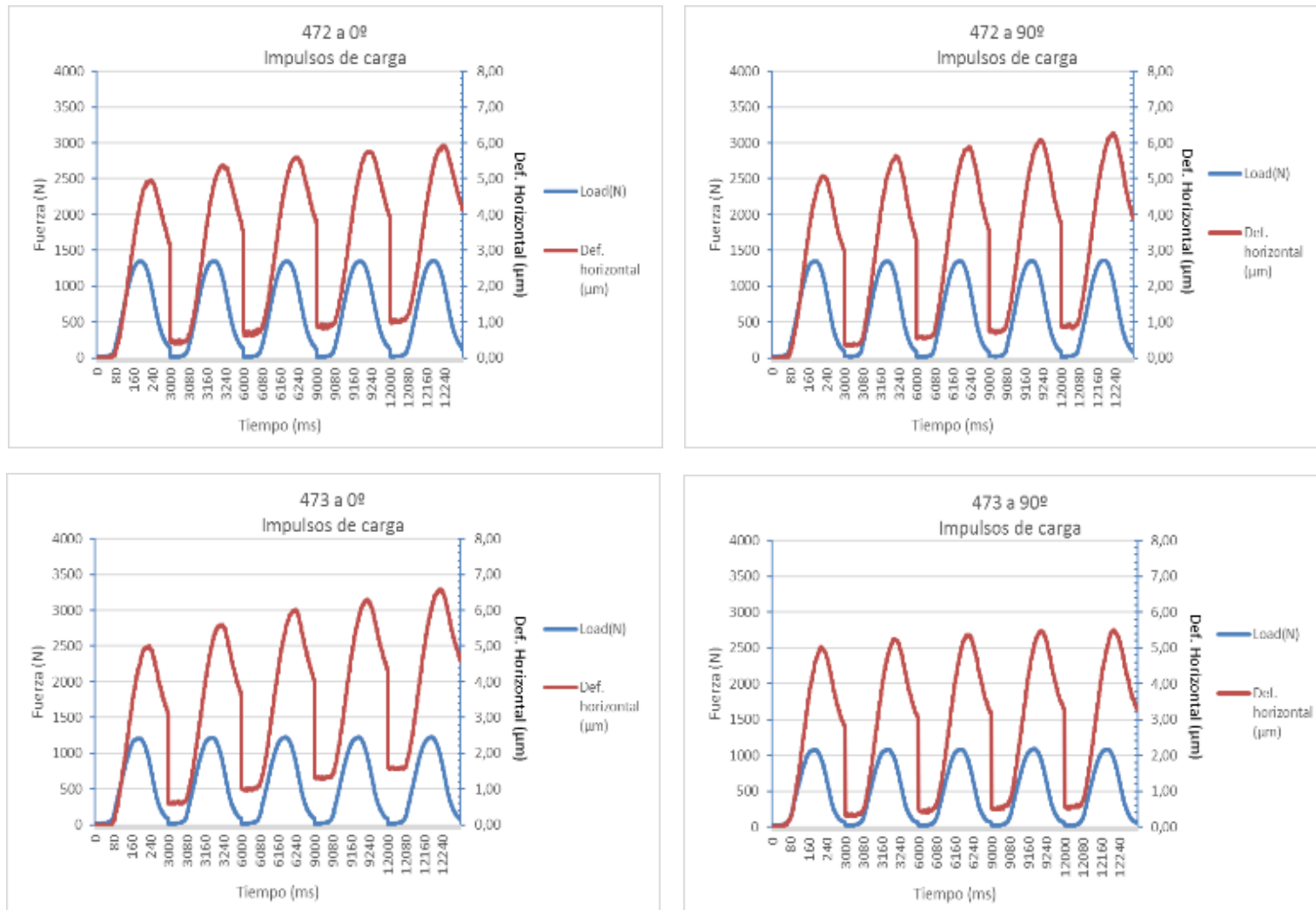


Figura 61. Gráficas impulsos de carga SMA 16 6,1% BM

