



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

**INFLUENCIA DE LOS COMPONENTES DEL MÁSTICO
EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS**

TESIS DOCTORAL

ANA ELENA HIDALGO ARROYO

DIRECTORES:

**PROFESORA: M^a CARMEN RUBIO GÁMEZ
PROFESOR: FERNANDO MORENO NAVARRO**

**ESCUELA DE DOCTORADO DE CIENCIAS, TECNOLOGÍAS E INGENIERÍAS
PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL (B23 56 1)**

2023

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: Ana Elena Hidalgo Arroyo
ISBN: 978-84-1195-250-7
URI: <https://hdl.handle.net/10481/90814>

DECLARACIÓN

La doctoranda / The doctoral candidate [Ana Elena Hidalgo Arroyo] y los directores de la tesis / and the thesis supervisors: [Profesora M^a Carmen Rubio Gámez y Profesor Fernando Moreno Navarro]

Garantizamos, al firmar esta tesis doctoral, que el trabajo ha sido realizado por la doctoranda bajo la dirección de los directores de la tesis, y hasta donde nuestro conocimiento alcanza, en la realización del trabajo, se han respetado los derechos de otros autores al ser citados cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

Guarantee, by signing this doctoral thesis, that the work has been done by the doctoral candidate under the direction of the thesis supervisor/s and, as far as our knowledge reaches, in the performance of the work, the rights of other authors to be cited (when their results or publications have been used) have been respected.

Lugar y fecha / Place and date:

San José, Costa Rica, November 14th, 2023

Director/es de la Tesis / Thesis supervisor/s;

Profesora M^a Carmen Rubio Gámez

Doctoranda / Doctoral candidate:

Ana Elena Hidalgo Arroyo

Firma / Signed

Profesor Fernando Moreno Navarro

Firma / Signed

Firma / Signed

TESIS COMO AGRUPACIÓN DE PUBLICACIONES

Esta tesis doctoral se basa en una colección de artículos científicos, publicados por la doctoranda, relevantes para su área de conocimiento. Para lograr esto, se cumplieron las siguientes condiciones requeridas:

- a) Esta tesis doctoral consiste en la recopilación de tres trabajos de investigación en un informe, publicado por la doctoranda en revistas de alto impacto relevantes en su campo de conocimiento, según lo recomendado por el Consejo Asesor de Escuelas de Doctorado (CAED).
- b) Los artículos fueron publicados con posterioridad a la obtención de los títulos de pregrado y maestría.
- c) Los artículos no han sido utilizados en ninguna tesis anterior.
- d) Los coautores de las publicaciones presentadas declaran no haber presentado estos artículos en otra tesis y no lo harán en el futuro. También se ha señalado la contribución de la doctoranda a los trabajos mencionados.
- e) Esta tesis doctoral está compuesta por los artículos científicos antes mencionados integrados como capítulos en el documento.

La doctoranda ha cumplido con todos los derechos de propiedad intelectual relativos a la difusión de los artículos utilizados en la tesis doctoral.

Los artículos científicos que se utilizaron para esta tesis se resumen (junto con su factor de impacto) a continuación:

1. **Hidalgo, A.E.**; Moreno-Navarro, F.; Tauste-Martínez, R.; Rubio-Gámez, M.C. *The Influence of Reclaimed Asphalt Pavement on the Mechanical Performance of Bituminous Mixtures. An Analysis at the Mortar Scale*. Sustainability 2020, 12, 8343. <https://doi.org/10.3390/su12208343>
 FACTOR DE IMPACTO: 3.251 CUARTIL: Q2
2. Tauste-Martínez, R.; **Hidalgo, A.E.**; García-Travé, G.; Moreno-Navarro, F.; Rubio-Gámez, M.C. *Influence of Type of Filler and Bitumen on the Mechanical Performance of Asphalt Mortars*. Materials 2022, 15, 3307. <https://doi.org/10.3390/ma15093307>
 FACTOR DE IMPACTO: 3.748 CUARTIL: Q3
3. Tauste, R., **Hidalgo, A.**, García, G., Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gámez, M. (2022). *Understanding the influence of filler type and asphalt binder content on the moisture and fatigue resistance of asphalt mortars*. Materiales De Construcción, 72(348), e301. <https://doi.org/10.3989/mc.2022.03522>
 FACTOR DE IMPACTO: 2.113 CUARTIL: Q3

AGRADECIMIENTOS

No es fácil resumir el agradecimiento que siento a todas las personas involucradas en el desarrollo de este trabajo. En primer lugar, tengo que agradecer a mis directores, el profesor Fernando Moreno Navarro y la profesora María del Carmen Rubio Gámez, por el apoyo, compartir sus conocimientos y por su guía lo largo de los años de doctorado.

Agradecer infinitamente a mis compañeros del Laboratorio de Ingeniería de la Construcción, LabIC, por la ayuda que me han prestado de manera incondicional, también han sido fundamentales para mi aprendizaje, pero más aún por el tiempo que pasamos juntos tanto dentro como fuera del laboratorio. Es una suerte haber tenido la bendición de trabajar con ustedes y poder llamarlos amigos.

Por último, quiero agradecer también a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada y a las instalaciones del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería.

Deseo agradecer a todas las demás personas que, de diversas maneras, contribuyeron a este proyecto. Su colaboración fue esencial, y sin su ayuda, este trabajo no habría visto la luz.

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN	I
TESIS COMO AGRUPACIÓN DE PUBLICACIONES	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
ÍNDICE GENERAL.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ACRÓNIMOS	X
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XIII
ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL.....	XIV
CAPÍTULO 1. INTRODUCCION	1
1.1. INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS BASICOS	1
1.2. ANTECEDENTES.....	2
CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	4
2.1.JUSTIFICACIÓN	4
2.2.OBJETIVOS.....	5
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	6
3.1. MATERIALES.....	6
3.2. METODOS.....	10
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	16
4.1. THE INFLUENCE OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT ON THE MECHANICAL PERFORMANCE OF BITUMINOUS MIXTURES. AN ANALYSIS AT THE MORTAR SCALE.....	17
4.1.1. ABSTRACT	17
4.1.2. INTRODUCTION	17
4.1.3. MATERIALS AND METHODS	19
4.1.4. RESULTS.....	25
4.1.5. CONCLUSIONS	29
4.1.6. REFERENCES	29
4.2. INFLUENCE OF TYPE OF FILLER AND BITUMEN ON THE MECHANICAL PERFORMANCE OF ASPHALT MORTARS	32
4.2.1. ABSTRACT	32
4.2.2. INTRODUCTION	32

4.2.3.	MATERIALS AND METHODS	34
4.2.4.	RESULTS AND DISCUSSION.....	39
4.2.5.	CONCLUSIONS	45
4.2.6.	REFERENCES	45
4.3.	UNDERSTANDING THE INFLUENCE OF FILLER TYPE AND ASPHALT BINDER CONTENT ON THE MOISTURE AND FATIGUE RESISTANCE OF ASPHALT MORTARS.....	49
4.3.1.	ABSTRACT	49
4.3.2.	INTRODUCTION	49
4.3.3.	MATERIALS AND METHODS	51
4.3.4.	RESULTS AND DISCUSSION.....	56
4.3.5.	CONCLUSIONS	61
4.3.6.	REFERENCES	62
CAPÍTULO 5.	CONCLUSIONES	66
CAPÍTULO 6.	POSIBLES LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	69
CAPÍTULO 7.	REFERENCIAS.....	70
CAPÍTULO 8.	ANEXOS	78
ANEXO 1.	PROTOCOLO DE FABRICACIÓN DE LA MUESTRA	79
	PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.....	79
	DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD	81
	MOLDEO DE LOS ESPECIMENES.....	81
	EXTRACCIÓN DE LOS ESPECÍMENES.....	82
	ALMACENAMIENTO DE LAS MUESTRAS	83
ANEXO 2.	PROTOCOLO DE FABRICACIÓN DE LA MUESTRA	84
	EQUIPO	84
	ADITAMENTOS.....	85
	BARRIDO DE FRECUENCIA-CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO	85
	FATIGA-CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO	86

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 3. 1. MATERIALES UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE LOS MORTEROS ESTUDIADOS EN LAS DISTINTAS ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN	7
FIGURA 3. 2. PROCESO PARA OBTENER LAS PROBETAS USADAS EN EL DMA. .. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
FIGURA 3. 3. DISGREGACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN GRUPOS PARA DEFINIR EL CONTENIDO DE LIGANTE ASFÁLTICO EMPLEADO EN LOS MORTEROS.	11
FIGURA 3. 5. ESQUEMA DEL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE TRABAJABILIDAD (W-P) EN MORTEROS ASFÁLTICOS.....	12
FIGURA 3. 5. EJEMPLO DE LA GRÁFICA DE FUERZA MÁXIMA VS CICLOS DE CARGA OBTENIDA PARA UNA PROBETA EN EL ENSAYO DE FATIGA POR FLEXIÓN EN 3 PUNTOS.....	13
FIGURA 3. 6. EVOLUCIÓN DE LA DEFLEXIÓN (D) E IMÁGENES DE PROBETAS REGISTRADAS DURANTE LOS ENSAYOS DE FATIGA POR FLEXIÓN EN 3 PUNTOS EN UN DMA.....	14
FIGURA 3. 7. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS Y SEPARACIÓN EN GRUPOS.....	15
FIGURE 4.1 1. MATERIALS USED FOR THE MANUFACTURE OF THE MORTARS STUDIED.	21
FIGURE 4.1 3. ASPECT OF THE SPECIMENS USED IN DMA TESTS.....	22
FIGURE 4.1 4. SKETCH OF THE CALCULATION OF THE WORKABILITY PARAMETERS (W-P) IN ASPHALT MORTARS.....	23
FIGURE 4.1 5. ASPECT OF THE MORTAR SPECIMEN BEFORE AND AFTER FATIGUE 3-POINT BENDING TEST IN DMA.	23
FIGURE 4.1 6. DETAIL OF THE CRACK EVOLUTION CONTROL PERFORMED DURING THE TESTS.	24
FIGURE 4.1 7. EXAMPLE OF THE MAXIMUM FORCE VS LOAD CYCLES GRAPH OBTAINED IN THE FATIGUE 3-POINT BENDING TEST IN DMA.	24
FIGURE 4.1 8. DEFLECTION (D) REGISTERED DURING THE 3-POINT BENDING FATIGUE TESTS.....	25
FIGURE 4.1 9. COMPACTION CURVES OF THE MORTARS STUDIED.	26
FIGURE 4.1 10. FATIGUE LAWS OF THE MORTARS STUDIED OBTAINED IN THE 3-POINT BENDING FATIGUE TEST USING THE DMA.	27
FIGURE 4.1 11. RESULTS OF STIFFNESS AND MAXIMUM DEFLECTION MEASURED THE DIFFERENT MORTARS STUDIED.	27

FIGURE 4.1 12. ANALYSIS OF THE MECHANICAL PERFORMANCE OF THE MORTARS STUDIED: (A) LOAD AMPLITUDE FOR A GIVEN DISPLACEMENT; (B) FATIGUE RESISTANCE FOR A GIVEN LOAD AMPLITUDE.	28
FIGURE 4.2 1. COMPONENTS OF THE ASPHALT MORTARS STUDIED.....	35
FIGURE 4.2 2. OBTAINING PROCESS OF THE MORTAR SAMPLES USED IN DMA TESTS.	36
FIGURE 4.2 3. LAYOUT OF THE THREE-POINT BENDING CONFIGURATION EMPLOYED IN MORTAR CHARACTERIZATION.....	37
FIGURE 4.2 4. EXAMPLE OF THE MAXIMUM FORCE DEVELOPMENT AND IMAGE MONITORING IN THE FATIGUE 3-POINT BENDING TEST IN DMA.....	39
FIGURE 4.2 5 DEFLECTION (D) REGISTERED DURING 3-POINT BENDING FATIGUE TESTS	39
FIGURE 4.2 6 RESULTS OF STIFFNESS AND MAXIMUM DEFLECTION MEASURED THE MORTARS WITH CEMENT ACTIVE FILLER. M1 CONVENTIONAL BINDER M3 MODIFIED BINDER	40
FIGURE 4.2 7 RESULTS OF STIFFNESS AND MAXIMUM DEFLECTION MEASURED THE MORTARS WITH CaCO ₃ ACTIVE FILLER. M2 CONVENTIONAL BINDER M4 MODIFIED BINDER.	41
FIGURE 4.2 8. COMPARISON BETWEEN TYPES OF BITUMEN FOR MORTARS MANUFACTURED WITH PORTLAND CEMENT (A) AND CaCO ₃ (B).....	42
FIGURE 4.2 9. COMPARISON BETWEEN TYPES OF ACTIVE FILLER FOR MORTARS MANUFACTURED WITH PENETRATION BINDER (A) AND POLYMER-MODIFIED BITUMEN (B).	43
FIGURE 4.2 10. RELATIONSHIP BETWEEN MAXIMUM DEFLECTION, STIFFNESS AND FATIGUE LIFE OF THE DIFFERENT MORTARS STUDIED.	44
FIGURE 4.3 1. MATERIALS USED FOR THE MANUFACTURE OF THE MORTARS STUDIED.	51
FIGURE 4.3 2 DISAGGREGATION OF ASPHALT MIXTURE INTO GROUPS TO DEFINE THE BITUMEN CONTENT EMPLOYED IN ASPHALT MORTARS.....	53
FIGURE 4.3 3 PREPARATION OF THE SAMPLES USED IN THE STUDY AND SEPARATION INTO GROUPS.....	54
FIGURE 4.3 4 EXAMPLE OF THE GRAPH OF MAXIMUM FORCE VS. LOAD CYCLES OBTAINED FOR AN SPECIMEN IN THE 3-POINT BENDING FATIGUE TEST.	55
FIGURE 4.3 5. DEFLECTION (D) EVOLUTION AND SPECIMEN IMAGES REGISTERED DURING THE 3-POINT BENDING FATIGUE TESTS ON A DMA.....	56

FIGURE 4.3 6 INFLUENCE OF THE TYPE OF FILLER ON STIFFNESS AND MAXIMUM DEFLECTION OF ASPHALT MORTARS.....	57
FIGURE 4.3 7 INFLUENCE OF THE TYPE OF FILLER ON FATIGUE RESISTANCE OF ASPHALT MORTARS BEFORE (A) AND AFTER (B) THE ACTION OF THE WATER.	58
FIGURE 4.3 8 RESULTS OF STIFFNESS AND MAXIMUM DEFLECTION FOR MORTARS WITH DIFFERENT BINDER CONTENT.	59
FIGURE 4.3 9 FATIGUE LAWS OF THE ASPHALT MORTARS MANUFACTURED WITH DIFFERENT BITUMEN CONTENT.	60

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3. 1. DESCRIPCIÓN DE LOS MORTEROS.....	6
TABLA 3. 2. PROPIEDADES DE LA ARENA UTILIZADA EN EL ESTUDIO.	8
TABLA 3. 3. PROPIEDADES DE LOS LIGANTES ASFÁLTICOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO.....	8
TABLA 3. 4. PROPIEDADES DE LOS LIGANTES ASFÁLTICOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO.....	8
TABLA 3. 5. PROPIEDADES DEL RAP USADO PARA FABRICAR LOS MORTEROS.	9
TABLA 3. 6. DENSIDAD APARENTE DE LOS MORTEROS.	9
TABLE 4.1 1. COMPONENTS OF THE MORTARS EVALUATED DURING THIS STUDY.....	20
TABLE 4.2 1.COMPOSITION OF THE ASPHALT MORTARS STUDIED.	34
TABLE 4.2 2.CHARACTERISTICS OF THE SAND EMPLOYED.....	35
TABLE 4.2 3. CHARACTERISTICS OF THE FILLERS EMPLOYED.....	35
TABLE 4.2 4.PROPERTIES OF THE BINDERS EVALUATED IN THE STUDY.....	36
TABLE 4.2 5. DENSITY OF THE ASPHALT MORTARS TESTED.....	36
TABLE 4.2 6 AVERAGE VALUES OBTAINED AT A LOAD LEVEL OF 10 N EMPLOYED IN THE CONSTRUCTION OF THE PARAMETRIC RANKING	44
TABLE 4.3 1 PROPERTIES OF THE LIMESTONE SAND EMPLOYED IN THE STUDY.	52
TABLE 4.3 2. PROPERTIES OF THE FILLERS EMPLOYED IN THE STUDY.	52
TABLE 4.3 3 COMPOSITION AND DENSITY OF THE MORTARS EVALUATED DURING THIS STUDY....	53

ACRÓNIMOS

FAM	Matriz de Agregados Finos
BBTM	Betón Bitumineux Très Mince, EN-13108-2
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i> (de sus siglas en ingles)
DMA	Dynamic Mechanical Analyzer (de sus siglas en ingles)
SMA	Stone Mastic Asphalt, EN-13108-5 (de sus siglas en ingles)
PA	Porous Asphalt, EN-13108-7 (de sus siglas en ingles)
MRef	Mortar without RAP
MM	Mortar Medium RAP Rate
MH	Mortar High RAP Rate
MH+R	Mortar High RAP Rate + Rejuvenator
EN	Normas Europeas
Nf	Cycles to failure
S	Stiffness
F	Maximum force applied at the 1000th load cycle
dmax	Maximum deflection

RESUMEN

La elección de materiales y mezclas asfálticas es un aspecto crítico en la construcción y mantenimiento de infraestructuras viales. No se trata solo de una decisión técnica, sino de un factor clave que determina la durabilidad y el rendimiento a largo plazo de las carreteras. Una correcta selección de materiales y mezclas asfálticas puede asegurar no solo la capacidad de las vías para soportar cargas de tráfico y condiciones ambientales adversas, sino también su resistencia a las tensiones cíclicas y los daños por fatiga que pueden surgir con el tiempo. En este sentido, el diseño óptimo de las mezclas asfálticas se convierte en un elemento fundamental para garantizar la eficacia y longevidad de las estructuras viales.

La presente tesis doctoral se centró en el desarrollo de una metodología de investigación que permitiera analizar de manera eficiente las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, considerando diversas variables y factores influyentes. Esta metodología se basó en un enfoque de ejecución rápida que tenía como objetivo reducir la cantidad de material, tiempo y recursos necesarios para llevar a cabo los análisis. Esto, a su vez, no solo contribuiría a la eficiencia en el proceso de diseño y caracterización de mezclas asfálticas, sino que también sería una aproximación respetuosa con el medio ambiente, minimizando el uso de recursos naturales.

El núcleo de esta metodología se basó en el uso del Dynamic Mechanical Analyzer (DMA) y una configuración de flexión de tres puntos. Esta tecnología permitió una caracterización detallada de la respuesta mecánica de los morteros asfálticos, ofreciendo información crucial sobre aspectos como la rigidez, la ductilidad y la resistencia a la fatiga. La investigación se desarrolló en tres etapas distintas, cada una con objetivos específicos y enfoques diferenciados.

En la primera etapa, se investigaron los efectos de diferentes tipos de rellenos activos y ligantes asfálticos. Se observó que la vida a fatiga aumentó al utilizar un ligante modificado con polímero, mientras que la deformación permanente y la capacidad portante se vieron menos afectadas al usar cemento en lugar de carbonato de calcio como relleno activo.

En la segunda etapa, se evaluaron la resistencia a la fatiga, la trabajabilidad y la deformación de morteros asfálticos fabricados con diferentes proporciones de pavimento asfáltico recuperado (RAP). A pesar de que se ha investigado previamente el papel del mortero en las mezclas asfálticas, pocos estudios han analizado los impactos de la presencia de RAP. Los resultados revelaron que la inclusión de RAP reduce la trabajabilidad y ductilidad de los morteros asfálticos, pero también aumenta la rigidez, lo que contribuye a una mayor resistencia a la fatiga. El uso de rejuvenecedores resultó efectivo para contrarrestar los efectos negativos en la trabajabilidad y la ductilidad causados por el RAP, sin afectar la resistencia a la fatiga y la adherencia del material.

La tercera etapa se enfocó en la susceptibilidad al agua de los morteros de mezcla asfáltica. Para garantizar la durabilidad de los materiales asfálticos, es esencial seleccionar materiales con baja susceptibilidad al daño por humedad. El estudio examinó la influencia del tipo de relleno activo y el contenido de ligante en la respuesta mecánica de los morteros asfálticos antes y después de la exposición al agua. Los resultados destacaron que el uso de cemento Portland en los morteros

incrementa la rigidez, reduce la ductilidad y mejora la resistencia a la fatiga y la resistencia al agua en comparación con el carbonato de calcio. Además, se identificó un contenido óptimo de ligante asfáltico basado en los resultados de fatiga, ya que un contenido excesivo compromete la resistencia a la fatiga y un contenido insuficiente afecta negativamente la resistencia a la fatiga y la susceptibilidad a la humedad.

En resumen, esta metodología innovadora permite optimizar el diseño de materiales asfálticos al proporcionar una comprensión más profunda de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, lo que a su vez contribuye a la mejora del desempeño y la durabilidad de las infraestructuras viales.

ABSTRACT

Adequate materials selection together with an asphalt mixtures optimal design plays a fundamental role in the performance, durability and functionality of pavement roads, therefore of transport infrastructure.

To date, a significant amount of research has been carried out with aim of achieving optimal mix designs, that guarantee adequate performance of pavement through the study of the mechanical behavior of asphalt mixtures and binders. However, despite the important role of mastic and mortar in the mechanical properties of asphalt mix, less research has been carried out to date, being this the main motivation of this doctoral thesis. Therefore, the main objective was to establish a fast execution methodology that required less material for the study and analysis of asphalt mixtures mechanical properties. Thus, helping simplifying the design and characterization process by using fewer resources, time and materials.

A new analysis methodology is presented based on a rapid execution experiment by using the Dynamic Mechanical Analyzer (DMA) and a three-point bending configuration, that allowed to characterize the mechanical response of asphalt mortars in terms of stiffness, ductility, and fatigue. The study consisted of three phases varying the mastic components, such as type of asphalt binder, type of active filler or recycled material (RAP), to analyze the mechanical response.

The first study considered mastics with different types of fillers and asphalt binders. It was observed fatigue life increased by using a polymer-modified binder, while permanent deformation and higher bearing capacity were lesser affected by using cement instead of calcium carbonate as active filler.

On the second phase, resistance to fatigue, workability and deformation of mastic were analyzed by using different proportions of reclaimed asphalt pavement (RAP). As a main result, it was shown that RAP causes an increase in stiffness, therefore inducing an elastic response and in consequence an increase in fatigue life, which could compensate for the loss of ductility. This aspect, together with the low sensitivity to water, shown when using Portland cement as an active filler, would allow the production of higher RAP content asphalt materials, with a long-term mechanical performance similar to that of conventional mixtures. In addition, the use of rejuvenators, effectively corrects the negative impact on workability and ductility caused by RAP, without affecting the fatigue resistance and the material adhesion/cohesion.

Third and final phase consisted on study the water susceptibility of the mastic. Results indicated that Portland cement provides a higher, degree of stiffness, lower ductility and better fatigue and water resistance, compared to calcium carbonate. Also, it was possible to establish an optimum asphalt content based on fatigue results. Higher asphalt contents reduced the action of the water, but compromised the fatigue resistance, in contraposition, lower asphalt contents led to poorer performance in both fatigue and water resistance.

Finally, the proposed methodology allows mastic characterization as a tool to optimize the design of asphalt mixtures.

ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL

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

En el capítulo 1 se realiza a manera de introducción una descripción de conceptos básicos, antecedentes y situación actual o estado del arte.

Posteriormente en el capítulo 2, se detallan la justificación se formulan los objetivos de la investigación que se van a desarrollar en esta Tesis Doctoral.

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

El capítulo 4 se dedica al análisis de resultados donde se describen cada una de las publicaciones realizadas. La primera de ellas se resume en la subsección 4.1 sobre un análisis a escala de mortero sobre la influencia del pavimento asfáltico recuperado (RAP) en el desempeño mecánico de mezclas asfálticas. La subsección 4.2 resume el trabajo realizado para determinar la influencia del tipo de filler y el ligante asfáltico en el desempeño de morteros asfálticos y por último la subsección 4.3 describe la influencia del tipo de filler y el contenido de ligante asfáltico en la resistencia a la humedad y la fatiga de los morteros.

En el capítulo 5 se exponen las conclusiones obtenidas. En el capítulo 6 se señalan las posibles futuras líneas de investigación relacionadas con lo expuesto en este trabajo. Y por último capítulo 7 se desglosan las referencias utilizadas para la elaboración de este documento.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS BASICOS

Las mezclas asfálticas están compuestas por árido gruesos y finos de diferentes tamaños mezclados con un ligante asfáltico. Los áridos constituyen el esqueleto mineral de la mezcla aportando resistencia a esfuerzos de compresión. Mientras, el ligante garantiza la cohesión y aporta la resistencia a los esfuerzos de tracción y cortantes (Moreno-Navarro et al., 2015b).

Aproximadamente el 90% de la mezcla lo constituyen los áridos y pese a que el ligante asfáltico representa entre un 4 y 5% de esta, juega un papel clave ya que es el responsable del comportamiento visco-elástico de las mezclas. Tiene un importante papel en la resistencia a la deformación y a la fisuración, dos de las principales causas del fallo estructural del pavimento. (Moreno-Navarro et al., 2015a).

Por eso es de suma importancia cuando se está caracterizando y seleccionando el tipo de ligante a emplear en la fabricación de una mezcla, tener presente las propiedades o aspectos convenientes para optimizar una determinada propiedad de la mezcla y los efectos negativos que puedan tener para otra, ya que esto influye de manera significativa en el desempeño final de la mezcla y por ende la estructura vial. Estas mismas consideraciones se deben de tomar cuando se selecciona el filler.

En las mezclas asfálticas se define como filler a la fracción de agregado que pasa por el Tamiz Nº 200, puede provenir de las fracciones componentes del agregado mineral fino o de un material de aporte como el cemento, cal, material calcáreo o calizos, cenizas volantes, entre otros. Su rol en una mezcla asfáltica es complejo; por un lado, puede servir como material inerte para rellenar los huecos presentes en la mezcla de áridos, mientras que, por otro, dada su finura y características superficiales, o composición química, se comporta como un material activo aportando propiedades físico-químicas en el sistema filler/asfalto. (Ruiz, 1960) El polvo mineral o filler, tiene un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas asfálticas. Por esto, una de las razones para usar estos materiales granulares en las mezclas asfálticas se basa principalmente en aspectos como reducir los costos iniciales, ya que el filler se incrusta en el mortero, la demanda de asfalto se reduce; Además de incidir directamente en el desempeño final de la mezcla al aumentar la rigidez, la resistencia al daño por humedad, mejorar la adherencia y por ende la durabilidad a largo plazo de la estructura de pavimento.

El filler y el ligante forman una mezcla llamada mástico, que ocupa los espacios entre el agregado pétreo, este mástico es el encargado de muchas de las propiedades de la mezcla, siendo este el principal aglomerante y responsable del desempeño, con características como cohesión, estabilidad, impermeabilidad, resistencia ante la deformación permanente y la fatiga.

Numerosos estudios han indicado que la adición de filler mineral a un ligante asfáltico aumenta la resistencia, este aumento y el cambio en las propiedades reológicas ha atraído a los investigadores a reportar datos y modelos que describan los cambios debidos a la naturaleza física y mineralógica del filler y su relación con el tipo de asfalto. [Sandoval, I et al. (2011)].

Es por esta razón que una adecuada selección de los materiales y mezclas asfálticas utilizadas en la construcción de estructuras viales ejerce un papel fundamental en el desempeño, durabilidad y funcionalidad de la infraestructura de transporte. Un diseño óptimo de mezcla asfáltica garantizaría suficiente capacidad de carga y flexibilidad para contrarrestar el inicio de la fisuración a bajo niveles de tensión (Loria, L; Sebaaly PE, 2008), una buena interacción entre los componentes (Presti, D.L et al, 2016), y la capacidad de resistir la fatiga asociado con las cargas de tráfico y las tensiones térmicas (Pérez-Jiménez, F et al, 2008). Contrarrestando, fenómenos de fatiga que podrían dar camino al progresivo agrietamiento y rotura de las capas de mezcla asfáltica, una de las principales razones detrás de la falla estructural en los pavimentos (Moreno-Navarro, F et al, 2015).

1.2. ANTECEDENTES

La infraestructura vial tiene una función esencial en la actualidad y es el de facilitar el transporte tanto de personas como bienes con comodidad y seguridad, haciendo necesaria la provisión de una red que considere estas necesidades. Es importante ofrecer una red vial que satisfaga las necesidades reales del país en cuanto al desarrollo económico-social y considere a los usuarios que buscan confort, seguridad, así como ahorro en tiempo de viaje y en costos de operación de los vehículos, llevando consigo un beneficio considerable al país.

El crecimiento del volumen de tráfico, el efecto del cambio climático, el aumento de las cargas axiales permisibles son algunos de los factores que afectan directamente el estado de la infraestructura vial y que por lo tanto requieren de la mejora continua y de la investigación de los materiales utilizados en la pavimentación de carreteras.

Una técnica comúnmente utilizada es la incorporación de un filler adecuado en las mezclas asfálticas, ya que este puede mejorar las propiedades del medio continuo asfáltico (mástico), tales como viscosidad, adherencia y provee de un mayor espesor a la lámina que recubre a los áridos, permitiendo retardar el envejecimiento e incidiendo de manera directa en el desempeño final.

Diferentes estudios han analizado las características físico-químicas básicas del filler o comportamiento reológico a nivel de ligante asfáltico [(Kim, YR., 2003), (Underwood, B., Kim Y.R., 2011)]. Sin embargo, este tipo de análisis carece de la consideración de la interacción entre el asfalto, el filler y la parte más fina de los agregados como factor fundamental condicionante del comportamiento mecánico de los materiales asfálticos. Por ello, el análisis de un nivel intermedio como la caracterización de la Matriz de Agregados Finos (FAM) ayudaría a determinar con precisión las repercusiones del uso de diferentes tipos de filler y de ligante en fenómenos como el agrietamiento por fatiga. Esto es posible estudiándolo a la escala que más condiciona la respuesta visco elástica del material.

En este sentido y a pesar de que representan un porcentaje bajo dentro de la mezcla asfáltica, entre un 4 y 5%, los materiales que conforman FAM; es decir, el asfalto, la fracción de agregado más fina de la mezcla asfáltica y el filler; son los responsables de proporcionar una adecuada cohesión al material granular (De Sousa, PC, 2010). El mortero asfáltico (FAM) también condiciona la respuesta visco elástica de toda la mezcla y, con ella, su resistencia a la fatiga y al agrietamiento (Moreno-

Navarro, F, 2012). Además, tanto el filler como el ligante son, a pesar de su baja proporción, los materiales constituyentes más caros de la mezcla, especialmente si se emplean filler activos o ligantes modificados con polímeros.

Por lo tanto, es importante conocer, con la mayor precisión posible, la influencia real del ligante asfáltico empleado ya sea de penetración o modificado y el tipo de relleno natural o activo sobre la respuesta mecánica de las mezclas (Rahman, A., 2012).

Hay varios estudios [(Nabizadeh, H., et al, 2017), (Ding, J.et al, 2020) (Hidalgo A. et al, 2020)] que han empleado este tipo de análisis como método para caracterizar la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas. Según estos resultados, el análisis de morteros asfálticos se ha mostrado como un método viable ya que aborda el problema de la composición heterogénea de las mezclas asfálticas mediante la caracterización de un material más homogéneo (i.e., FAM) [(Saqued, M- et al, 2016)].

Este tipo de análisis permite examinar la influencia precisa de diferentes filler o incluso ligantes asfálticos modificados con polímeros, ya que análisis la superficie específica máxima de las mezclas asfálticas. A esta escala, se anticipa una mayor concentración de ligante y se puede lograr una sensibilidad más cercana a la mezcla completa [(Im, S. et al (2015), (Tauste-Martinez, R. et al, 2021)]. No obstante, a pesar de ello, todavía existe carencia de una metodología común en cuanto a la caracterización de la fatiga (considerando diferentes ensayos y criterios de fallo) en este tipo de análisis. A su vez, esto limita la difusión de su uso como herramienta en el diseño de mezclas asfálticas y la evaluación de diferentes materiales relacionados con los morteros.

El objetivo de este estudio es analizar la influencia del tipo de relleno y asfalto en la rigidez, ductilidad y resistencia a la fatiga mediante la implementación de una metodología de análisis basada en la caracterización de fatiga de morteros asfálticos (FAM) mediante el uso del DMA (*Dynamic Mechanical Analyser*) por flexión en tres puntos.

CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

2.1. JUSTIFICACIÓN

El diseño del pavimento debe ser capaz de garantizar una estructura que, en conjunto, sea capaz de resistir los efectos del tránsito y factores climáticos como deformaciones y agrietamientos, sin perder su capacidad estructural, y permitir la circulación en condiciones óptimas de forma segura y eficiente.

La adición de filler al asfalto es una de las modificaciones que se hacen para mejorar las características de las mezclas asfálticas, ya sea en presencia de comportamientos poco favorables en los pavimentos o para la búsqueda de mejorar el desempeño de este ante alguna solicitud específica de la estructura vial.

Pese a que es una técnica regularmente utilizada en el diseño actual de pavimentos los filler o rellenos activos poseen diversas características físicas y químicas que son poco estudiadas a nivel del efecto que tiene estos componentes del mástico y que repercuten en el desempeño de la mezcla asfáltica. Modificar parámetros como tipo de filler o la relación filler/asfalto son una forma de determinar el efecto que tienen en el comportamiento del mástico y no existe actualmente un ensayo que permita determinar la presencia de un filler en específico y cuáles son los aportes de este en el desempeño final de esta mezcla.

La realización de esta investigación permite no solamente determinar la influencia de los componentes del mortero en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas y analizar qué componente ejerce una mayor influencia en la respuesta mecánica de la misma, sino que aporta un modelo de ensayo a nivel de mortero, de ejecución rápida además de realizarse en un equipo versátil como lo es el *DMA*.

2.2. OBJETIVOS

El objetivo principal de esta tesis doctoral es determinar la influencia de diferentes componentes del mástico en el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas a escala de los morteros asfálticos.

Además, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar la influencia del tipo de filler en el comportamiento mecánico de morteros asfálticos.
- Evaluar la influencia del tipo de asfalto en el comportamiento mecánico de morteros asfálticos.
- Evaluar la influencia de la relación filler/asfalto en el comportamiento mecánico de morteros asfálticos.
- Evaluar la influencia de la presencia de RAP en el comportamiento mecánico de morteros asfálticos.
- Implementar un protocolo de ensayo para morteros utilizando el DMA, que permita detectar diferencia en los tipos de mezclas y las propiedades de resistencia de estas.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

En este capítulo se detalla el enfoque sistemático adoptado para dar respuesta a los objetivos de investigación definidos en esta tesis doctoral.

Esta investigación se centró en determinar la influencia de los componentes del mástico en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas y analizar su influencia en la respuesta mecánica de la misma, por lo que para la realización de este trabajo es necesario, en primer lugar, definir la elección de los materiales de la mezcla asfáltica y establecer un plan de ensayos, que se detallan a continuación:

3.1. MATERIALES

Para el desarrollo de esta investigación se fabricaron doce diferentes tipos de morteros, donde se varió los componentes del mástico dependiendo de la fase de la investigación. Para el desarrollo de la primera fase se fabricaron cuatro morteros donde se utilizó en el diseño distintos contenidos de RAP y aditivo para determinar la influencia del RAP. En la segunda etapa de esta investigación se fabricaron cuatro morteros donde se varió el tipo de filler activo utilizando cemento Portland o Carbonato de Calcio (CaCO_3) y el tipo de ligante asfáltico, utilizando un ligante asfáltico convencional B35/50 o un ligante asfáltico modificado PMB 25/35-65, para determinar la influencia del tipo de filler y ligante. Y en la fase final se fabricaron otros cuatro morteros donde se modificó en el diseño del mortero el porcentaje de filler/ligante utilizado. En la Tabla 3.1, se describen los materiales utilizados y el diseño de los morteros fabricados, en la

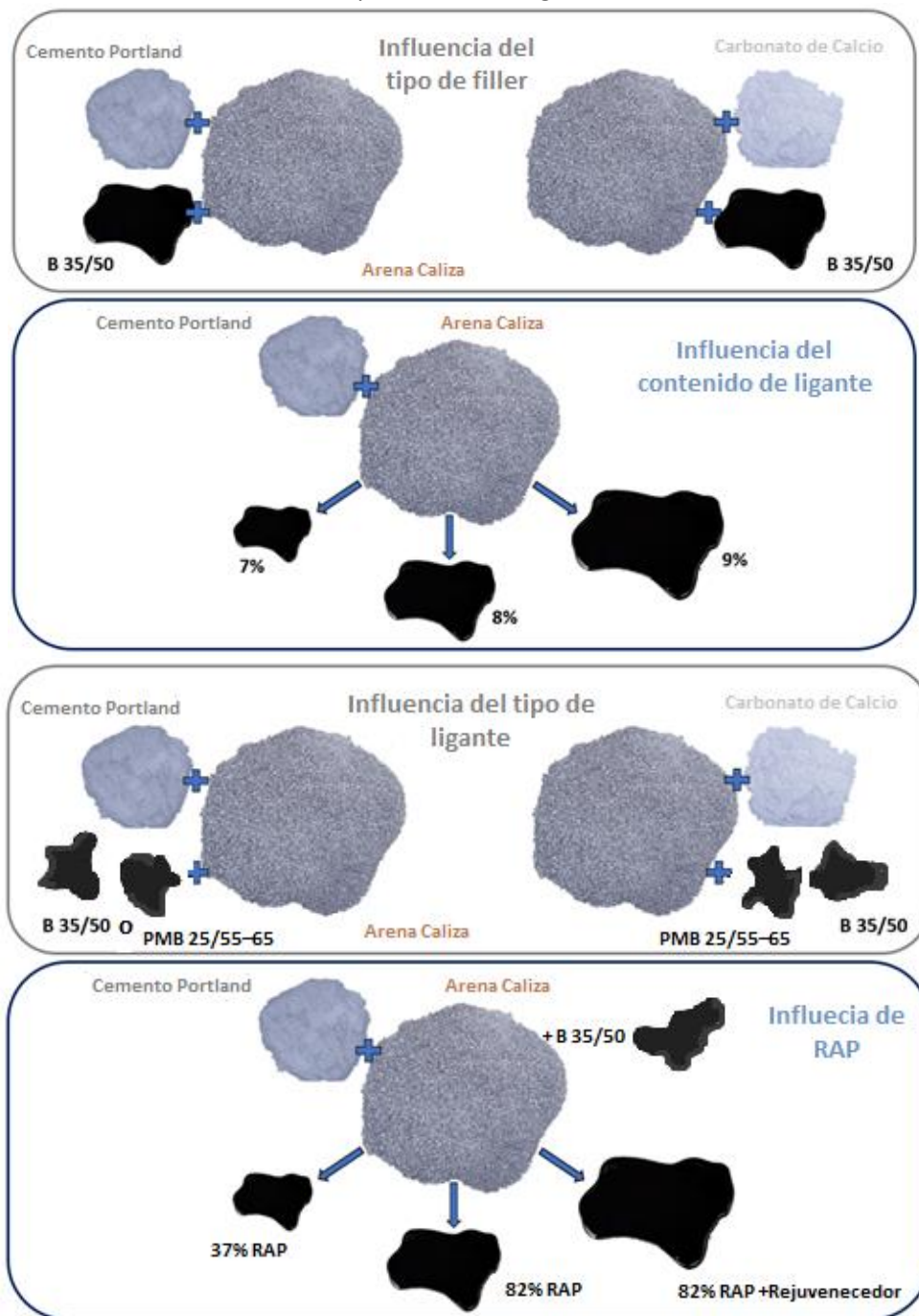
Tabla 3. 1 se esquematiza los materiales utilizados.

Tabla 3. 1. Descripción de los morteros

Objetivo del estudio	Nombre	Arena 0-2 mm	*Contenido Arena (%)	Filler	*Contenido Filler (%)	Betún	*Contenido Betún (%)	*Contenido de RAP (%)
Influencia de RAP	MRef	Caliza	70.0	Cemento	27.6	B35/50	8.0	0.0
	MM	Caliza	70.0	Cemento	22.5	B35/50	5.5	37.0
	MH	Caliza	70.0	Cemento	15.0	B35/50	3.0	82.0
	MH+R	Caliza	70.0	Cemento	15.0	B35/50	3.0	82.0
Influencia tipo filler	M1	Caliza	70.0	Cemento	30.0	B35/50	8.0	0.0
	M2	Caliza	70.0	CaCO_3	30.0	B35/50	8.0	0.0
Influencia tipo de betún	M3	Caliza	70.0	Cemento	30.0	PMB 25/55-65	8.0	0.0
	M4	Caliza	70.0	CaCO_3	30.0	PMB 25/55-65	8.0	0.0
Influencia de la relación filler/betún	CC8	Caliza	64.4	Cemento	27.6	B35/50	8.0	0.0
	CEM8	Caliza	64.4	Cemento	27.6	B35/50	8.0	0.0
	CEM7	Caliza	65.1	Cemento	27.9	B35/50	7.0	0.0
	CEM9	Caliza	63.7	Cemento	27.3	B35/50	9.0	0.0

*Porcentaje (%) sobre el peso total del mortero

Figura 3. 1. Materiales utilizados en la fabricación de los morteros estudiados en las distintas etapas de la investigación



Los doce morteros asfálticos se fabricaron a partir de una arena caliza de tamaño máximo de árido 2 mm, a continuación, se presenta en la

Tabla 3. 2 las características de la arena utilizada.

Tabla 3. 2. Propiedades de la arena utilizada en el estudio.

Granulometría (EN 933-1)	Tamiz (mm)	Porcentaje de material pasando (%)
	2	100
	0.5	18
	0.063	0
Equivalente de arena (EN 933-8)		77.0
Densidad (Mg/m ³) (EN 1097-6)		2.77
Absorción (%) (EN 1097-6)		0.88

En diez de los morteros se utilizó para la producción de estos un ligante asfáltico convencional B35/50. En el caso de los otros dos morteros fabricados se utilizó un ligante asfáltico modificado PMB 25/35-65, en la

Tabla 3. 3 se describen las propiedades.

Tabla 3. 3. Propiedades de los ligantes asfálticos utilizados en el estudio.

Propiedades	B 35/50	PMB 25-35/65
Penetración (mm) (EN 1426)	38	32
Temperatura del punto de ablandamiento (°C) (EN 1427)	54	65

Se utilizó en el proceso de elaboración de estos morteros dos filler activos, cemento Portland para diez de los morteros del estudio y Carbonato de Calcio (CaCO₃) para los restantes dos morteros. A continuación, se presenta la

Tabla 3. 4 con las principales características de estos.

Tabla 3. 4. Propiedades de los ligantes asfálticos utilizados en el estudio.

	Tamiz (mm)	Porcentaje de material pasando (%)	
		Cemento	Carbonato de Calcio
Granulometría (EN 933-1)	2	100.0	100
	0.5	100.0	100
	0.125	100.0	100
	0.063	96.0	94.0
Densidad (Mg/m ³) (EN 1097-3, anexo A)		2941.0	2770.0

Por último, para el desarrollo de la primera fase de esta investigación se trabajó con material de pavimento asfáltico reciclado (RAP), el RAP fue recuperado de un proceso de fresado de una carretera después de 20 años de vida útil (utilizando sólo la fracción inferior a 2 mm), y un aditivo rejuvenecedor de asfalto líquido a base de organosilanos a escala nanométrica (que restaura el betún envejecido más cerca de la fase de máltenos, al capturar asfáltenos y/o moléculas oxidadas polares y las rodea con colas no polares). Las principales características de estos materiales se resumen en la Tabla 3. 5.

Tabla 3. 5. Propiedades del RAP usado para fabricar los morteros.

Granulometría (EN 933-1)	Tamiz (mm)	Porcentaje de material pasando (%)
	2	100
	0.5	54
	0.063	14.7
Porcentaje de ligante asfáltico extraído del RAP (%)		5.8
Penetración a 25 °C de ligante asfáltico extraído del RAP (dmm, EN 1426)		16
Punto de reblandecimiento de ligante asfáltico extraído del RAP (°C, EN 1427)		71

Los especímenes utilizados durante este estudio fueron fabricados calentando los diferentes componentes del mortero y el ligante a una temperatura de 165 °C. El control de la temperatura de las muestras se revisó a lo largo del proceso de fabricación y compactación utilizando una cámara térmica.

Posteriormente, se compactaron muestras cilíndricas con un diámetro de 150 mm utilizando un compactador giratorio (EN 12697-31) a una temperatura de 160 °C hasta alcanzar un contenido de vacíos cercano al 0% (lo que da lugar a alturas de probeta en torno a los 40 mm). Reduciendo al máximo los vacíos de aire presentes en el material, la adhesividad entre agregados y el ligante se puede realizar un análisis con mayor precisión (Hidalgo, A.; Moreno-Navarro, F.; Tauste, R.; Rubio-Gámez, M., 2020).

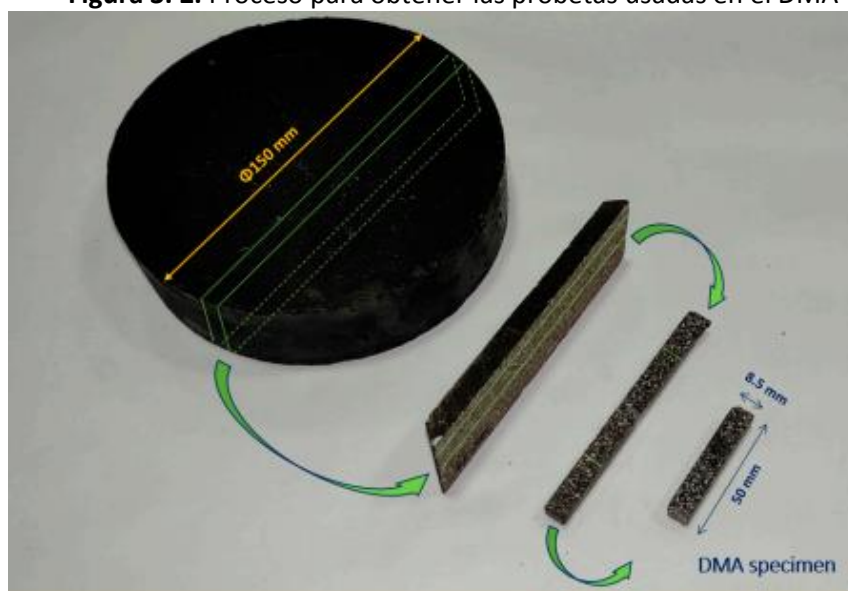
Estos especímenes cilíndricos fueron aserrados usando una sierra de corte por coordenadas de precisión para obtener muestras prismáticas en piezas de 8,5 mm × 8,5 mm × 50,0 mm de largo, utilizados posteriormente en la caracterización con el DMA (*Dynamic Mechanical Analyser*) de las probetas fabricadas, y la densidad de los diferentes morteros ensayados se describe a continuación en la Tabla 3. 6 y la

Figura 3. 1).

Tabla 3. 6. Densidad aparente de los morteros.

Objetivo del estudio	Nombre	Densidad Aparente (kg/cm ³) EN -12697-6
Influencia de RAP	MRef	2399
	MM	2406
	MH	2261
	MH+R	2247
Influencia tipo filler	M1	2453
	M2	2338
Influencia tipo de betún	M3	2423
	M4	2373
Influencia de la relación filler/betún	CC8	2338
	CEM8	2453
	CEM7	2419
	CEM9	2383

Figura 3. 2. Proceso para obtener las probetas usadas en el DMA



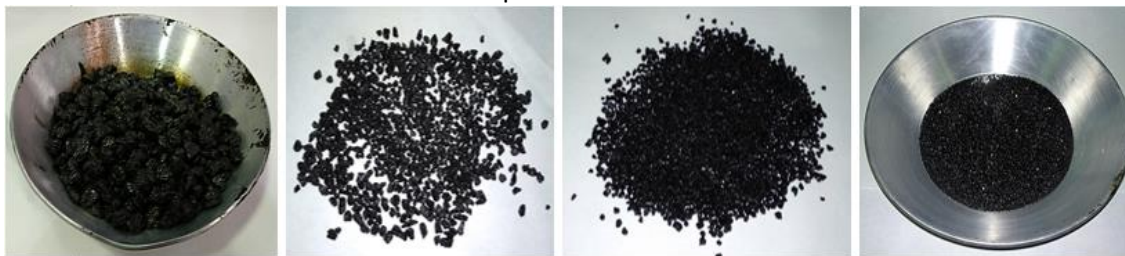
3.2. METODOS

Para la elaboración de los morteros asfálticos, se estableció un contenido de ligante asfáltico de referencia siguiendo la metodología propuesta en otros estudios [(Hidalgo, A.E et al; 2020), (Tauste-Martinez, et al, 2021), (Cavalcanti De Sousa, P., 2010)]. La cual consistió en la fabricación de la mezcla asfáltica completa destinada a la reproducción (en este caso en particular se utilizó una mezcla BBTM 11 B (UNE 13108-2) con un contenido de ligante asfáltico del 5,3% sobre el peso total de la mezcla), que luego se disgregó una vez que se enfrió como se esquematiza en la

Figura 3. **3.** Posteriormente se tamizó el material con la ayuda de bolas de metal, para separarlo en cuatro grupos, a saber:

- Grupo 1: Material retenido en el tamiz de 8 mm.
- Grupo 2: Material que pasa por el tamiz de 8 mm y queda retenido en el tamiz de 4 mm.
- Grupo 3: Material que pasa por el tamiz de 4 mm y queda retenido en el tamiz de 2 mm.
- Grupo 4: Material que pasa por el tamiz de 2 mm.

Figura 3. 3. Disgregación de la mezcla asfáltica en grupos para definir el contenido de ligante asfáltico empleado en los morteros.



En el Anexo 1, se presenta con mayor detalle el proceso de fabricación de los morteros, se describe desde el proceso de diseño, preparación de la muestra, moldeo y extracción de especímenes hasta el almacenamiento de los mismos.

Tal y como se mencionó en la sección **3.1 Materiales**, para cada uno de los morteros se fabricó al menos una probeta utilizando el compactador giratorio, y se determinó la densidad como parte de la caracterización de los morteros. Estas probetas se sometieron, tal y como se indicó anteriormente a un proceso de aserrado para obtener las probetas prismáticas de 8.5 mm x 8.5 mm x 50 m.

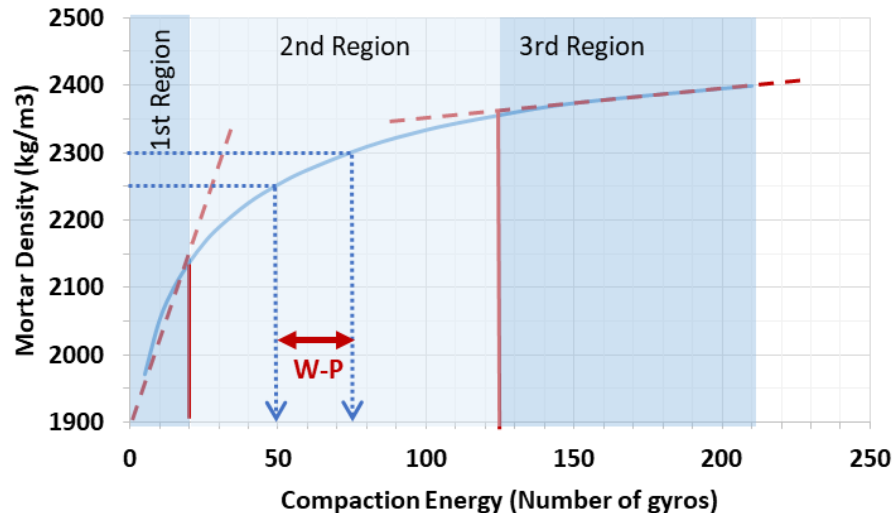
Los morteros asfálticos se fabricaron bajo las mismas condiciones de temperatura, mezclado y compactación, mencionadas en la acción anterior, solamente se realizaron variaciones en los componentes de dichos morteros dependiendo de la fase de la investigación. En la primera fase se incorporó diferentes contenidos de RAP a la mezcla, en el caso de la segunda fase se varió el tipo de filler y de ligante y por último en la tercera fase además de realizar variantes en el tipo de filler y ligante asfáltico utilizado se utilizaron diferentes contenidos de los mismos.

Tras la fabricación de los morteros, se realizó el ensayo de flexión en tres puntos en el DMA (*Dynamic Mechanical Analyser*), donde, se llevó a cabo la caracterización de las propiedades mecánicas de los morteros asfálticos, dependiente del objetivo específico de cada una de las fases de la investigación. A continuación, se describen los parámetros y características que fueron analizadas:

La trabajabilidad (W) de los especímenes se evaluó con base en la curva de compactación (densidad vs. número de giros) obtenida del compactador giratorio. En esta curva se pueden observar tres regiones diferentes como se muestra en la Figura 3.4: La primera región está asociada al contacto entre partículas (donde la densidad aumenta rápidamente y la eficiencia de compactación está relacionada con la organización inicial de los agregados); la segunda región está asociada a la compactación real del material (una vez que los agregados están en contacto, la energía de compactación los reorganiza y provoca la reducción de los vacíos de aire en el material); la tercera región está asociada a la compactación residual del material (donde la densidad crece muy lentamente, probablemente debido a movimientos puntuales de agregados o fracturas de agregados). En base a los resultados obtenidos durante la compactación de cada mortero, se calcula el parámetro de trabajabilidad (W-P) en la parte media de la segunda región de la curva (donde la energía de compactación es efectiva), y se mide como la energía (número de giros) necesario para

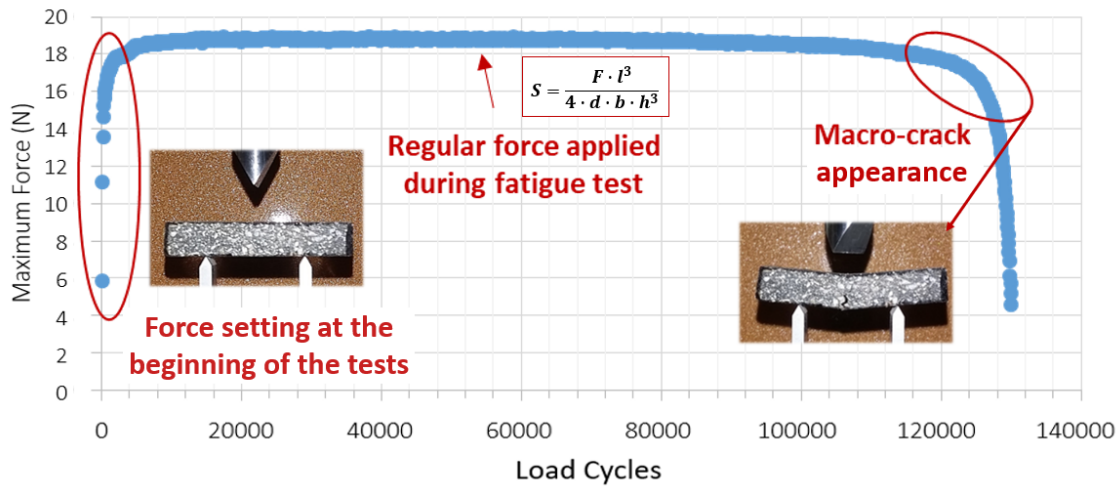
aumentar la densidad del mortero en 50 kg/m^3 . A medida que aumenta este parámetro, disminuye la trabajabilidad del mortero, por lo que se dificulta su compactación y aumenta la probabilidad de desprendimiento o problemas de fatiga. Como referencia se puede decir que el final de la primera región se determina cuando se necesitan más de 10 giros para aumentar la densidad del mortero a 1000 kg/m^3 y el inicio de la tercera región cuando se necesitan más de 80 giros para aumentar la densidad del mortero a 50 kg/m^3 .

Figura 3. 4. Esquema del cálculo de los Parámetros de Trabajabilidad (W-P) en morteros asfálticos.



Para cada una de las fases de la investigación se consideraron la misma cantidad de especímenes, para analizar por cada nivel de deformación estudiado (40, 60 y $80 \mu\text{m}$, ensayados en modo controlado por deformación). Estos presentan niveles de carga suficientes para alcanzar el rango de comportamiento visco elástico lineal y mantenerlo lo suficiente para la evaluación de cambios en rigidez y ductilidad antes de que ocurra la falla por fatiga. Cada muestra se ensayó a una temperatura de $35 \text{ }^\circ\text{C}$ (temperatura exigente para inducir la respuesta a la fatiga, que permite lograr una caracterización y duraciones de ensayo adecuadas) y 5 Hz hasta alcanzar el fallo por fatiga, como se observa en la Figura 3. 4.

Figura 3. 4. Ejemplo de la gráfica de fuerza máxima vs ciclos de carga obtenida para una probeta en el ensayo de fatiga por flexión en 3 puntos.



Para obtener las características mecánicas de los morteros se analizaron los distintos parámetros obtenidos de la realización del ensayo en las diferentes fases (Hidalgo, A.E et al; 2020). Las características son las siguientes:

Rigidez (S). Este parámetro permite evaluar la capacidad portante del material y con ella la resistencia a las deformaciones permanentes. Es una medida del comportamiento visco elástico del material (a medida que se eleva, el mortero se vuelve más elástico). Se calcula sobre el Módulo de Young obtenido de [1] (41) como relación entre la fuerza aplicada y la deflexión producida en la probeta de mortero después de 1000 ciclos de carga (Figura 3. 4):

$$S = \frac{F \cdot l^3}{4 \cdot d \cdot b \cdot h^3} \text{ [Ecuación 1]}$$

dónde:

F: fuerza máxima aplicada en el ciclo de carga 1000 (cuando la probeta se considera intacta)

l: longitud entre apoyos

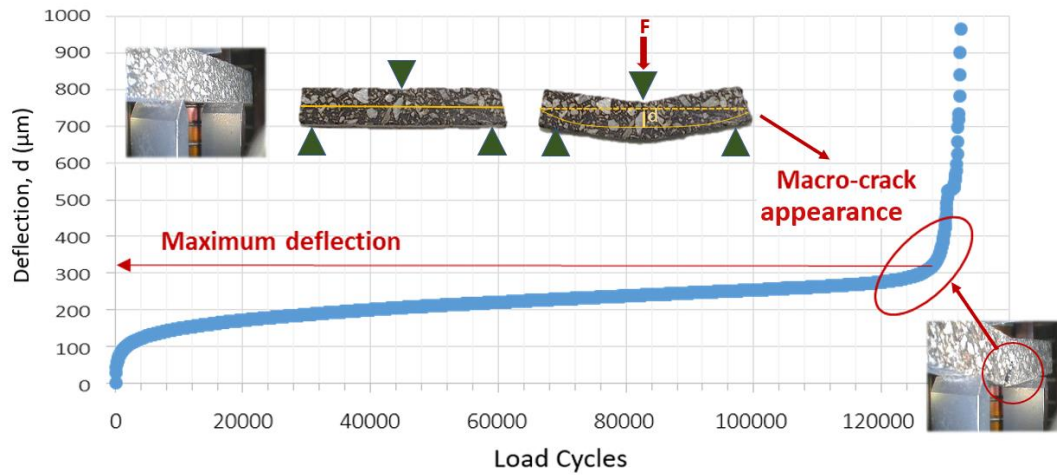
d: desplazamiento de deflexión medido en el ciclo 1000

b: ancho de la probeta

h: altura de la probeta

Deflexión máxima (dmax). Este parámetro permite evaluar la ductilidad del material ensayado: cuanto más aumenta este parámetro, mayor es la ductilidad. Se mide como la deflexión acumulada en la probeta antes de la aparición de daños significativos en forma de macro fisuras (Figura 3. 5).

Figura 3. 5. Evolución de la deflexión (d) e imágenes de probetas registradas durante los ensayos de fatiga por flexión en 3 puntos en un DMA.

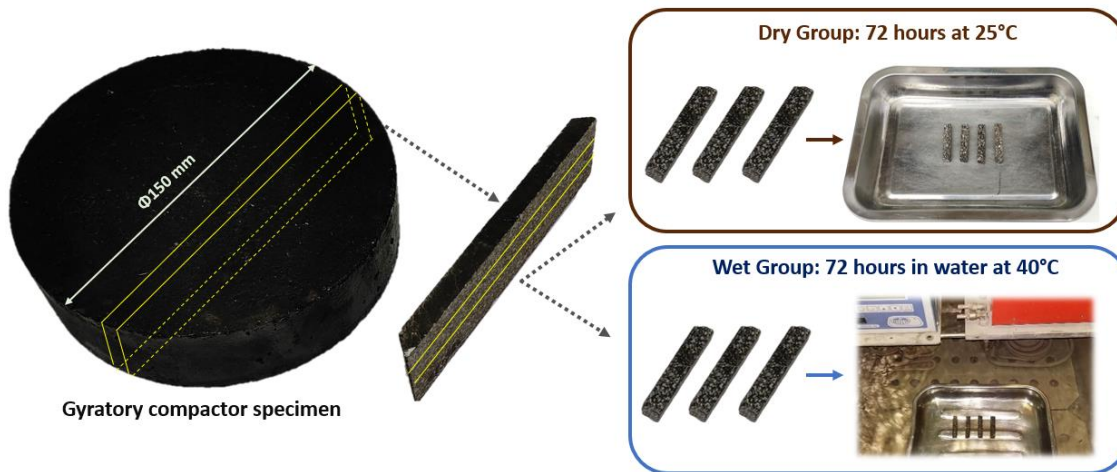


Ciclos a fallo (Nf). Este último parámetro es empleado a la hora de evaluar la resistencia a fatiga de los morteros ensayados y, por tanto, constituye un elemento clave en la evaluación de sus prestaciones mecánicas. Se define como el número total de ciclos de carga aplicados en la probeta hasta la aparición de una macrofisura. Esto se controla haciendo uso de una cámara en tiempo real instalada en el dispositivo DMA que se puede observar en la Figura 3. 5 y comparando las imágenes registradas con la fuerza máxima medida por la máquina en cada ciclo de carga (una caída brusca en los valores es indicativo de la macro-aparición de grieta como se muestra en la

Figura 3. . Alternativamente, si después de 250.000 ciclos de carga no aparece ninguna macrofisura, se definió que este sería el valor de falla de la probeta.

Para evaluar la **susceptibilidad al agua** de los morteros bituminosos, se realizó este procedimiento de ensayo sobre dos grupos de muestras de cada tipo de mortero (siguiendo una metodología similar a la establecida en el ensayo de sensibilidad al agua de mezclas bituminosas (EN 12697-12). Así, las probetas fabricadas se separaron en dos grupos: un grupo seco de muestras mantenidas a temperatura ambiente (20 ± 5 °C), y un grupo húmedo que se acondicionó durante 72 horas en agua a 40 °C después de aplicar un vacío a una presión de $6,7 \pm 0,3$ kPa durante 30 ± 5 minutos (Figura 3. 6).

Figura 3. 6. Preparación de las muestras y separación en grupos.



A partir de estos ensayos, se logró implementar de forma exitosa un protocolo de ensayo para estos morteros, utilizando el DMA, el cual permite detectar diferencia en los tipos de mezcla, dependiendo del tipo y proporción de los componentes del mástico presentes y las propiedades mecánicas como la resistencia. El Anexo 2 presenta de forma sistemática el protocolo de ensayo utilizado para los especímenes de morteros.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Este capítulo se centró en el análisis de resultados, se describen de manera precisa las publicaciones realizadas, cada una de las secciones cubre la introducción, los antecedentes, la metodología, los resultados, la discusión y las conclusiones que se desarrollaron a lo largo de esta investigación para determinar la influencia que tiene los diferentes componentes del mástico en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas.

Para alcanzar los objetivos planteados de la tesis, se completaron tres fases de investigación principales, las cuales se describen a continuación:

Todos los resultados se presentan en subsecciones en el Capítulo 4 y toman la forma de los artículos científicos publicados. El **Capítulo 4.1** evalúa los efectos de material reciclado (RAP) y rejuvenecedores sobre la trabajabilidad, el rendimiento a la fatiga y la sensibilidad al agua del mortero asfáltico en calientes utilizando el DMA. Para esto se elaboraron morteros con diferentes proporciones de RAP y a través de la implementación de un protocolo de ensayo a fatiga en morteros se evaluó el efecto del contenido del RAP a fatiga tanto para la condición humedad como seca. Además, se analizaron parámetros mecánicos como la deflexión máxima y la rigidez de los morteros lo que permite caracterizar el comportamiento a fatiga de estos.

Continuando con la segunda fase de investigación, en el **Capítulo 4.2** se describe los resultados obtenidos de analizar la influencia del tipo de filler y el ligante asfáltico sobre la rigidez, ductilidad y resistencia a la fatiga del mortero asfáltico. Esto a través de la implementación de una metodología de análisis utilizando el DMA (*Dynamic Mechanical Analyzer*). En esta fase se fabricaron los morteros bajo las mismas condiciones de temperatura, mezclado y compactación, pero se realizaron variaciones en el tipo de filler activo y el tipo de ligante asfáltico utilizado. Las probetas prismáticas de morteros se utilizaron para realizar el ensayo de flexión en tres puntos en el DMA (*Dynamic Mechanical Analyzer*), a partir de este ensayo se logró realizar un estudio de las propiedades viscoelásticas la resistencia mecánica ante cargas cíclicas de las diferentes tipologías de morteros.

El **Capítulo 4.3** tiene el objetivo de estudiar la susceptibilidad y el efecto del agua de los morteros, se desarrolló un estudio donde se implementó un procedimiento de ensayo para dos grupos de muestras diferentes de mortero, siguiendo una metodología similar a la establecida en el ensayo de sensibilidad al agua de mezclas asfálticas (EN 12697-12), este procedimiento se realizó para determinar los parámetros como fuerza axial, desplazamiento o deformación, y caracterizar el comportamiento a fatiga de diferentes mezclas de morteros asfálticos y así estimar la influencia del agua en el comportamiento mecánico de estos materiales asfálticos.

4.1. THE INFLUENCE OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT ON THE MECHANICAL PERFORMANCE OF BITUMINOUS MIXTURES. AN ANALYSIS AT THE MORTAR SCALE

4.1.1. Abstract

The main characteristics of bituminous mixtures manufactured with a considerable amount of reclaimed asphalt pavement (RAP), compared to conventional mixtures, are a reduction in workability, an increase in stiffness, and a loss of ductility, due to the presence of the aged bitumen contained in the RAP particles. To minimize these impacts, softer binders or rejuvenators are commonly used in the design of these mixtures in order to restore part of the ductility lost and to reduce the stiffness. In spite of previous investigations demonstrating that the mortar plays an essential role in the workability, long-term performance, and durability of bituminous mixtures (where cracking, cohesion, and adhesion problems all start at this scale), not many studies have assessed the impacts caused by the presence of RAP. In response to this, the present paper analyzes the workability, fatigue performance, and water sensitivity of bituminous mortars containing different amounts of RAP (from 0% to 100%) and rejuvenators. Mortar specimens were compacted using a gyratory compactor and studied via dynamic mechanical analysis under three-point bending configuration. The results demonstrated that the presence of RAP reduces the workability and ductility of asphalt mortars. However, it also causes an increase in their stiffness, which induces a more elastic response and causes an increase in their resistance to fatigue, which could compensate for the loss of ductility.

This aspect, together with the low water sensitivity shown, when using Portland cement as an active filler, would make it possible to produce asphalt materials with high RAP contents with a similar long-term mechanical performance as traditional ones. In addition, the use of rejuvenators was demonstrated to effectively correct the negative workability and ductility impacts caused by using RAP, without affecting the fatigue resistance and material adhesion/cohesion.

Keywords: bituminous mixtures; RAP; rejuvenators; sustainability; fatigue; water sensitivity

4.1.2. Introduction

Sustainability is currently a large global concern and a concept which involves balance between the environment, society, and the economy. One of its principals aims in developed countries is to achieve a resource-efficient and low carbon economy, with a focus on improving waste management across all life cycle stages and reducing energy consumption. In recent years, a key challenge has been to incorporate this concept into different human activities, where the construction and transportation sectors play a significant role. Therefore, having a sustainable road

¹ El trabajo en este capítulo se basa en la publicación: Hidalgo, A., Moreno-Navarro, F., Tauste, R. Gámez, M. (2020). The Influence of Reclaimed Asphalt Pavement on the Mechanical Performance of Bituminous Mixtures. An Analysis at the Mortar Scale. Sustainability. MDPI, Vol. 12(20), pages 1-12, October.

system is a necessity for solving the mobility needs for a safe and healthy society, while not incurring a negative impact on the environment and ensuring the technical and economic feasibility of projects [1]. This can be addressed through the eco-design of solutions used for the construction of these infrastructures [2,3].

In response to these needs, the use of reclaimed asphalt pavement (RAP) has the potential to become a viable and attractive alternative material for road construction [3,4]. The use of RAP presents environmental and economic benefits, such as the reduction of contaminant emissions, natural resource exploitation, raw material transportation, mixture production costs, energy consumption, fuel usage, and pressure on landfill disposal sites [5].

When properly crushed and screened, RAP consists of high-quality aggregates for new asphalt pavement layers, which can be used to replace an amount of virgin aggregate and asphalt binder in the mixture [6]. However, the presence of high amounts of RAP in bituminous materials could provide some drawbacks, such as loss of ductility or a lower cohesion inside the mixture (due to the higher stiffness and lower adhesion provided by the aged bitumen contained in the RAP). To compensate for these drawbacks, soft new bitumen can be used (which would be blended with the aged one to recompense for its deteriorated rheological properties), or rejuvenating agents [7] can be added to restore part of the chemical composition of the aged binder (which has been lost due to the oxidation and volatilization of the lighter compounds, [8]). Traditionally, asphalt rejuvenators are composed of the molecular fractions with the lowest weight found in asphalt binders (saturates and aromatics) [9] nonetheless, in recent years, new types of rejuvenators from other sources (most notably from plants) have started to emerge. Depending on their nature, these additives can interact differently with the aged binder contained in the RAP, leading to variations in the performance of the mixture [10].

Therefore, while these additives could potentially reduce the penetration or viscosity of an aged binder (since they are oil-based), not all rejuvenators would exert the same effect on the rheological properties of the aged binder, which will govern the final mechanical performance of the asphalt mixture [11].

Research concerning RAP has been especially prominent over the last few decades due to the increase in road transportation distances (due to the globalization of trade) and the reduction of investment in road conservation (due to the economic situation), which have resulted in the acceleration of road network deterioration around the world [12]. Rehabilitation works, consisting of the removal of the deteriorated upper layers of the pavement and their replacement using new asphalt materials, have become one of the most common and important activities for road administrations.

However, these works have caused the development of an environmental problem: RAP waste is increasing considerably, while its potential for use is still low, as its understanding as an employable recycled material is still limited, so it cannot yet be incorporated in high quantities for new asphalt surface layers where high mechanical and environmental resistance is needed.

While scientific advances have been made in recent decades for rejuvenating agents, the use of high amounts of RAP in the construction of asphalt surface layers is still a challenge. Due to their lower workability, ductility, and inner cohesion, asphalt materials manufactured with high amounts of RAP tend to fail prematurely due to pathologies such as cracks or stripping when they are directly exposed to the impacts of traffic, rain, temperature, etc. [13]. Both pathologies are strongly related to asphalt mortar characteristics (the part of the mixture composed of binder, filler, and sand [14]), as this part plays a very important role in the mechanical performance of asphalt surface layer mixtures such as BBTM (Betón Bitumíneo Trés Mince, EN-13108-2 [15]), SMA (Stone Mastic Asphalt, EN-13108-5 [16]) or PA (Porous Asphalt, EN-13108-7 [17]). Thus, the understanding of the effect of RAP and rejuvenating agents at this scale would be of crucial importance for the successful implementation of RAP at high recycling rates in the manufacture of asphalt surface layers.

Within this framework, the main objective of this study is to evaluate the effects of RAP and rejuvenators on the workability, fatigue performance, and water sensitivity of hot recycled bituminous mortars by using the dynamic mechanical analyzer (DMA).

4.1.3. Materials and Methods

4.1.3.1. Materials

During this study, four asphalt mortars were evaluated (Table 4.1 1): a reference mortar without RAP that was designed according to the characteristics of the mortars used for BBTM mixtures (composed of 64.4% of sand, 27.6% of filler, and 8.0% of asphalt binder, over the total weight of the mortar); two mortars with RAP, replacing part of the natural aggregates used in the reference mortar (one with a medium RAP content and other with a high RAP content); a mortar with a high RAP content, and a rejuvenating agent. The materials used for the manufacture of the mortars were a conventional asphalt binder (B35/50), limestone sand (with a maximum aggregate size of 2 mm and washed to remove filler particles contained in it), cement filler, RAP milled from a road after 20 years of service life (using only the fraction lower than 2 mm), and a liquid organosilane-based asphalt rejuvenator additive at a nanometric scale (which restores the aged bitumen closer to the maltenes phase, by capturing asphaltenes and/or polar oxidized molecules and surrounds them with nonpolar tails). It was decided to use the reference mortar of an asphalt mixture where this fraction plays an essential role and to manufacture it with a base asphalt binder in order to avoid other variables (such as the presence of polymers), which could interfere with properly studying the interaction between a virgin bitumen and an aged one at this scale. The main characteristics of these materials are summarized in Tables 4.1 2– 4.1.4 and Figure 4.1 1.

Table 4.1 1. Components of the mortars evaluated during this study.

Components	Mortar without RAP (MRef)	Mortar Medium RAP Rate (MM)	Mortar High RAP Rate (MH)	Mortar High RAP Rate + Rejuvenator (MH+R)
Asphalt binder B35/50 (% over the total weight of the mortar)	8.0	5.5	3.0	3.0
Limestone Sand (% over the total weight of the mortar)	64.4	35	0.0	0.0
Cement Filler (% over the total weight of the mortar)	27.6	22.5	15.0	15.0
RAP (% over the total weight of the mortar)	0.0	37.0	82.0	82.0
Rejuvenating agent (% over the total weight of the binder contained in the RAP)	0.0	0.0	0.0	0.15

Table 4.1 1. Properties of the sand used in the study.

Parameter	Sieve (mm)	Percentage of material passing (%)
Granulometry (EN 933-1)	2	100
	0.5	18
	0.063	0
Sand equivalent (EN 933-8)		77.0
Density (Mg/m3) (EN 1097-6)		2.77
Water absorption (%) (EN 1097-6)		0.88

Table 4.1 2. Properties of the reclaimed asphalt pavement (RAP) used in the mortars.

Parameter	Sieve (mm)	Percentage of material passing (%)
Granulometry (EN 933-1)	2	100
	0.5	54
	0.063	14.7
Percentage of asphalt bitumen extracted from RAP (%)		5.8
Penetration at 25 °C of the asphalt bitumen extracted from RAP (dmm, EN 1426)		16
Softening point of the asphalt bitumen extracted from RAP (°C, EN 1427)		71

Table 4.1 3. Characteristics of the cement filler used in the mortars.

Parameter	Sieve (mm)	Percentage of material passing (%)
Granulometry (EN 933-1)	2	100
	0.5	100
	0.125	100
	0.063	96.0
Density (Mg/m³) (EN 1097-3, annex A)		0.6

Figure 4.1 1. Materials used for the manufacture of the mortars studied.

The specimens used during this study were manufactured by heating the aggregates (sand, filler, and/or RAP) and binder to a temperature of 165 °C. The control of the temperature of the samples was reviewed throughout the manufacturing and compaction process using a thermal imaging camera.

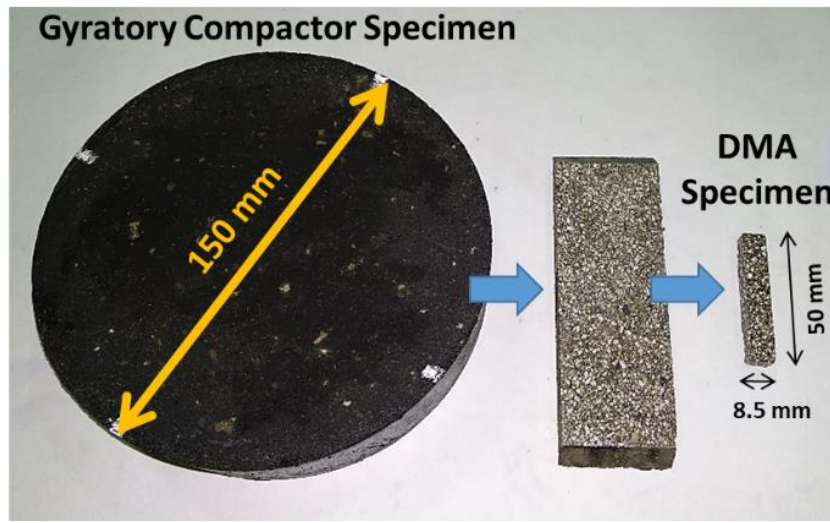
According to previous studies [20], the asphalt mortars were manufactured at a temperature of 165°C and cylindrical specimens of 150 mm diameter and 40 mm high were compacted to an air void content close to 0% using a gyratory compactor (EN-12697-31 [21]) at a temperature of 155 °C. By minimizing the air voids content, the adhesiveness between aggregates and bitumen, as well as the interaction between aged and virgin binder, can be studied without the influence of this variable.

Following on, cylindrical specimens were sawed into pieces 8.5 mm x 8.5 mm x 50.0 mm large to produce prismatic specimens for testing in the dynamic mechanical analyzer (DMA). Figure 4.1 2 displays the specimens manufactured, and Table 4.1 5 shows the density of the different mortars tested.

Table 4.1 4. Density of the mortar tested.

Mortar	Mortar without RAP (MRef)	Mortar Medium RAP Rate (MM)	Mortar High RAP Rate (MH)	Mortar High RAP Rate + Rejuvenator (MH+R)
Apparent Density (kg/m ³) EN-12697-6 [22]	2399	2406	2261	2247

Figure 4.1 2. Aspect of the specimens used in DMA tests.



4.1.3.2. Methods

The present research study has the objective of studying the workability, fatigue resistance, and water sensitivity of asphalt mortars manufactured with different dosages of RAP and rejuvenators.

The workability of the specimens was assessed based on the compaction curve (density vs. number of gyros) o Table 4.1 5 obtained from the gyratory compactor. In this curve, three different regions can be observed (Figure 4.1 3): The first region is associated with the contact between particles (where density increases fast and the compaction efficiency is related to the initial organization of the aggregates); the second region is associated to the real compaction of the material (once the aggregates are in contact, the compaction energy reorganizes them and causes the reduction of the air voids in the material); the third region is associated to the residual compaction of the material (where density grows very slowly, probably due to punctual aggregate movements or aggregate fractures). Based on the results obtained during the compaction of each mortar, the workability parameter (W-P) is calculated in the middle part of the second region of the curve (where compaction energy is effective), which is measured as the energy (number of gyros) needed to increase the density of the mortar in 50 kg/m³. As this parameter increases, the workability of the mortar decreases, therefore making its compaction more difficult and the probability of stripping or fatigue-related problems higher. As a reference, it can be said that the end of the first region is determined when more than 10 gyros are needed to increase the density of the mortar to 1000 kg/m³ and the beginning of the third region when more than 80 gyros are needed to increase the density of the mortar to 50 kg/m³.

Fatigue performance and water sensitivity of asphalt materials with RAP at a mortar scale were studied using the 3-point bending test in the DMA device. Based on these considerations, 18 prismatic specimens of each asphalt mortar were divided into two groups of 9 specimens: a dry and a wet group. The dry group was stored at room temperature in the laboratory (20 ± 5 °C). For the

wet group, a vacuum was applied for 30 ± 5 min until reaching a pressure of 6.7 ± 0.3 kPa and then immersed in water at a temperature of 40 °C for 72 h. After that, the 9 specimens of each group were subdivided into 3 subgroups of 3 specimens (each with different strain amplitudes in strain-controlled mode), and each subgroup was tested until reaching fatigue cracking failure (Figure 4.1 3) by applying a sinusoidal load at a frequency of 5 Hz at a temperature of 35 °C.

Figure 4.1 3. Sketch of the calculation of the Workability Parameters (W-P) in asphalt mortars.

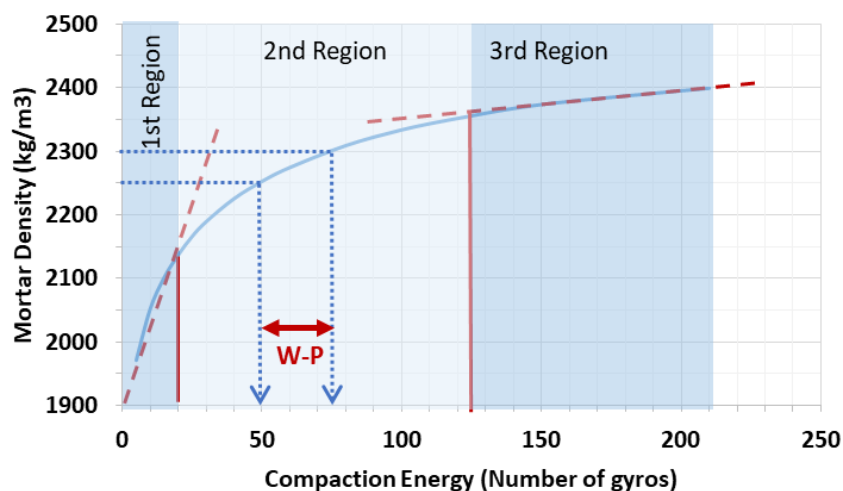
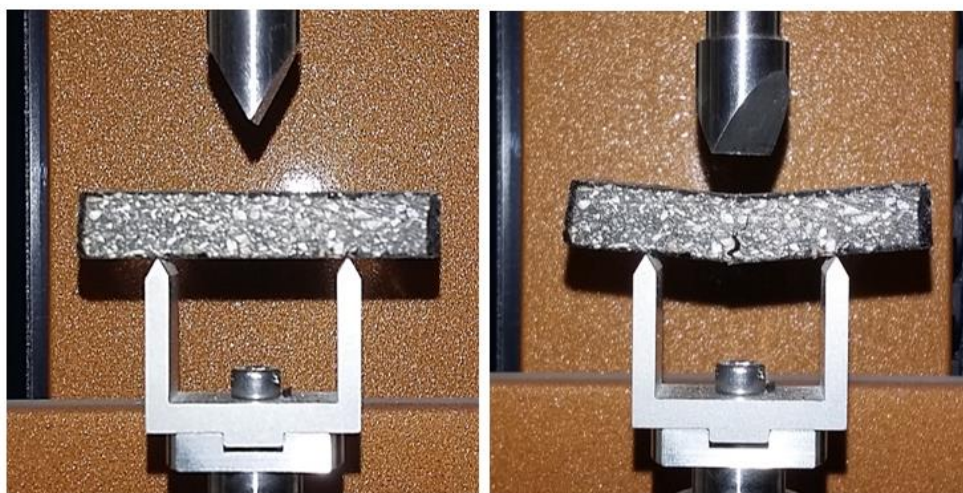


Figure 4.1 4. Aspect of the mortar specimen before and after fatigue 3-point bending test in DMA.



Based on the results obtained in the different tests, the fatigue performance was evaluated in both the dry and wet groups, while the water sensitivity was analyzed by comparing the results obtained between the two groups. The fatigue failure criterion used was the creation of a macro-crack in the specimens, which was identified using a camera installed in the DMA device (Figure 4.1 4) and by comparing the images recorded with the maximum force measured by the machine in each load cycle (when this force starts to drop down sharply, the macro-crack has appeared, Figure 4.1 5). A

maximum of 250,000 load cycles was also established as a failure criterion in the event of a macro-crack not occurring.

Figure 4.1 5. Detail of the crack evolution control performed during the tests.

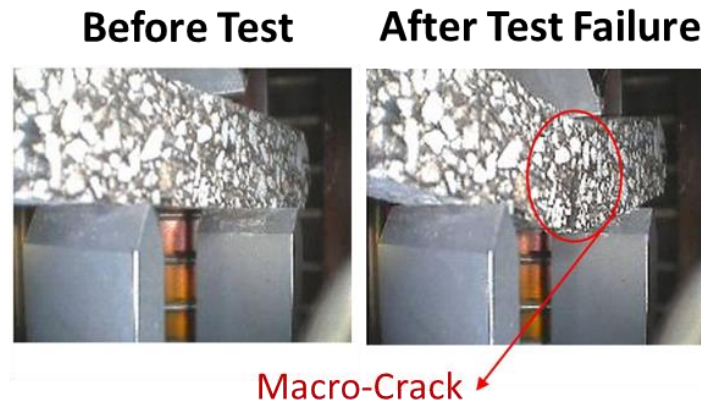
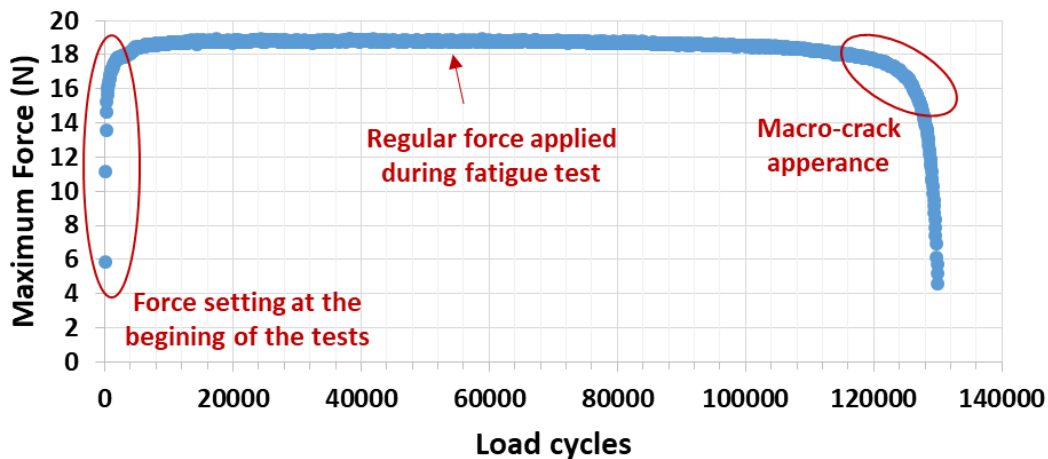


Figure 4.1 6. Example of the maximum force vs load cycles graph obtained in the fatigue 3-point bending test in DMA.



The mechanical performance of the mortars was evaluated according to the following parameters during the tests:

- Cycles to failure (N_f). Number of load cycles applied to the specimen until the appearance of a macro-crack. This parameter is set to 250,000. If a macro-crack did not appear in the specimens after 250,000 load cycles, a direct measurement of the mechanical resistance of the mortars was taken (the higher the parameter, the more resistant the mortars);
- Stiffness (S). Relationship between the force applied and the deflection produced in the mortar specimen after 1000 load cycles (Figure 4.1.7). This stiffness is calculated based on

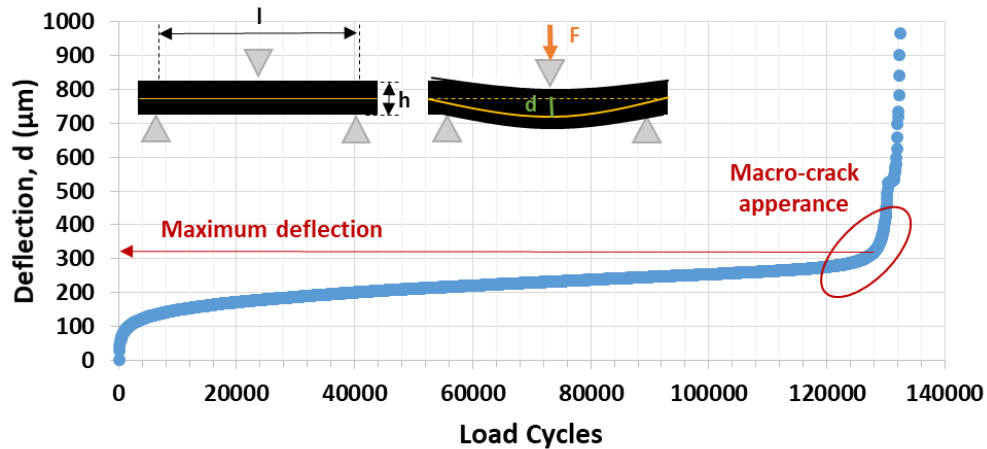
Young's modulus (Equation (1) [23]), which measures the viscoelastic response of the mortar (as it increases, the mortar behaves more elastically), as all the tests has been conducted under the same loading conditions (amplitude and frequency) and temperature;

$$S = \frac{F \times l^3}{4 \times d \times b \times h^3} \quad (1)$$

where F is the maximum force applied at the 1000th load cycle (where the specimen is considered undamaged); l is the length between the supports; d is the deflection displacement measured at the 1000th cycle; b is the width of the specimen; and h is the height of the specimen;

- Maximum deflection (d_{max}). Measured as the accumulated deflection in the specimen before the crack appears (Figure 4.1 8), this parameter measures the ductility (ability to deform before cracking) of the mortar studied. As the maximum deflection increases, the ductility of the mortar increases.

Figure 4.1 2. Deflection (d) registered during the 3-point bending fatigue tests.



4.1.4. Results

Figure 4.1 8 shows the compaction curves and the W-P of the different mortars studied. It can be observed that as the amount of RAP increases, the workability of the mortar decreases (having a W-P reduction of 37% when passing from high rates of RAP to medium rates, and of 55% when passing from medium rates to no RAP in the mortar manufacturing), which agrees with the findings of previous research studies at mixture scale [24,25]. This could be due to the lower presence of the original binder, as the RAP content is increased in the mortar (the aged binder contained in the RAP is more viscous than the virgin one, and therefore, its capacity to lubricate the aggregates is smaller). In this respect, it is interesting to highlight that the use of rejuvenators helps to improve the workability of the mortars (having a reduction of 22% in the W-P when using this additive with high rates of RAP), which should be due to its capacity to restore the aged bitumen.

Figure 4.1 3. Compaction curves of the mortars studied.

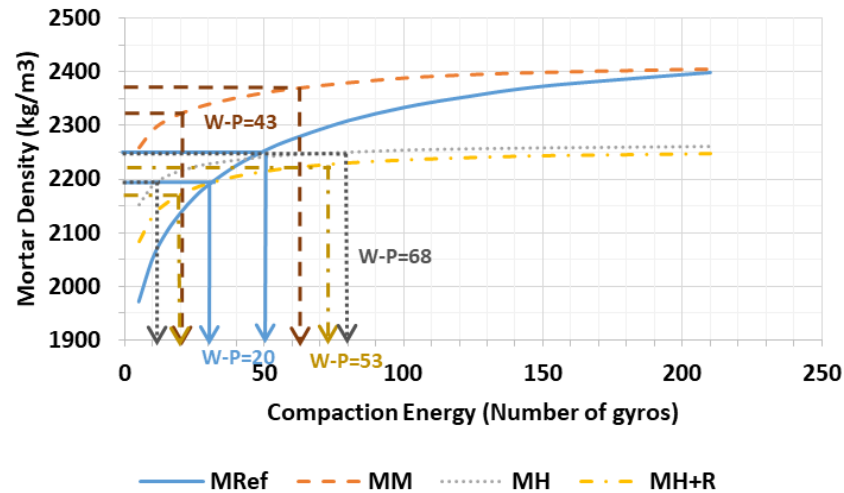


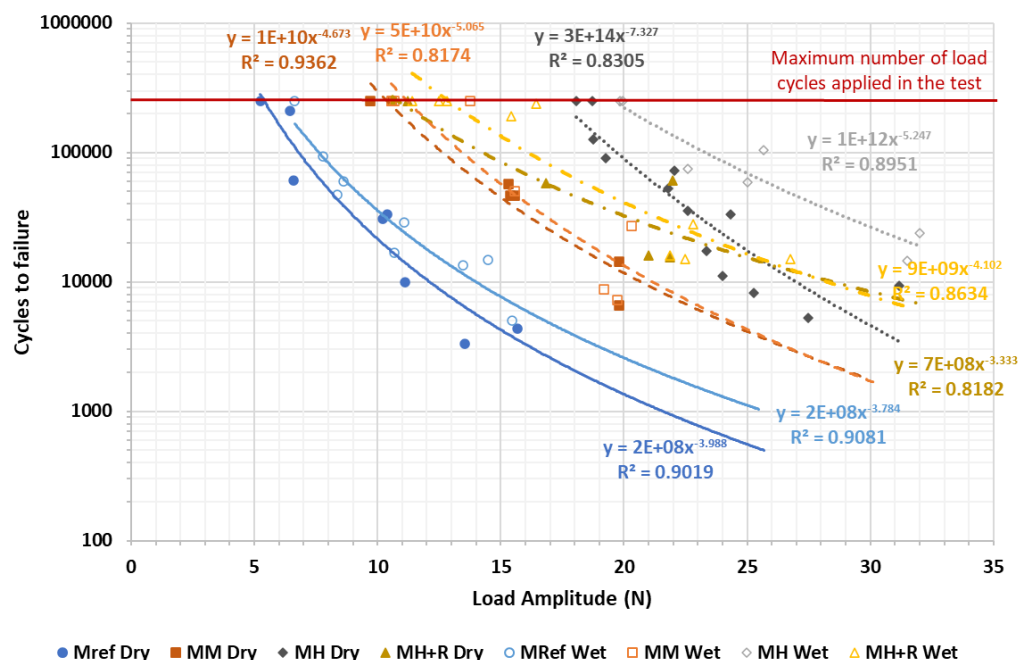
Figure 4.1.9 shows the fatigue life of the mortars, studied under dry and wet conditions, as a function of the regular force applied during the test. As can be observed, the differences found for the fatigue resistances are clearer between mortars as a function of the RAP content, rather than between the dry and wet conditions. This infers that the presence of water does not seem to affect the mechanical performance of asphalt mortars (probably due to the high presence of asphalt binder in the material).

Particularly, when Portland cement was used as an active filler, the fatigue resistance was found to improve even after the conditioning of the specimens in water. Meanwhile, it can be observed that, for the same load amplitude, as the RAP content is increased in the mortars, the fatigue life is also increased when analyzing the mechanical performance as a function of the RAP content. This aspect could be due to the higher elastic performance of the mortars as the RAP content increases (Figure 14.1.10).

The results obtained demonstrate that as the RAP content increases, the specimen stiffness also increases (having a reduction in stiffness of around 25% when passing from high RAP quantities to medium ones, and of around 50% when passing from medium RAP amounts to mortars without RAP). By contrast, the ductility (measured in terms of maximum deflection) is reduced (having around a 40% less ductility when using medium RAP rates in the mortar, and around a 70% less when using high RAP rates).

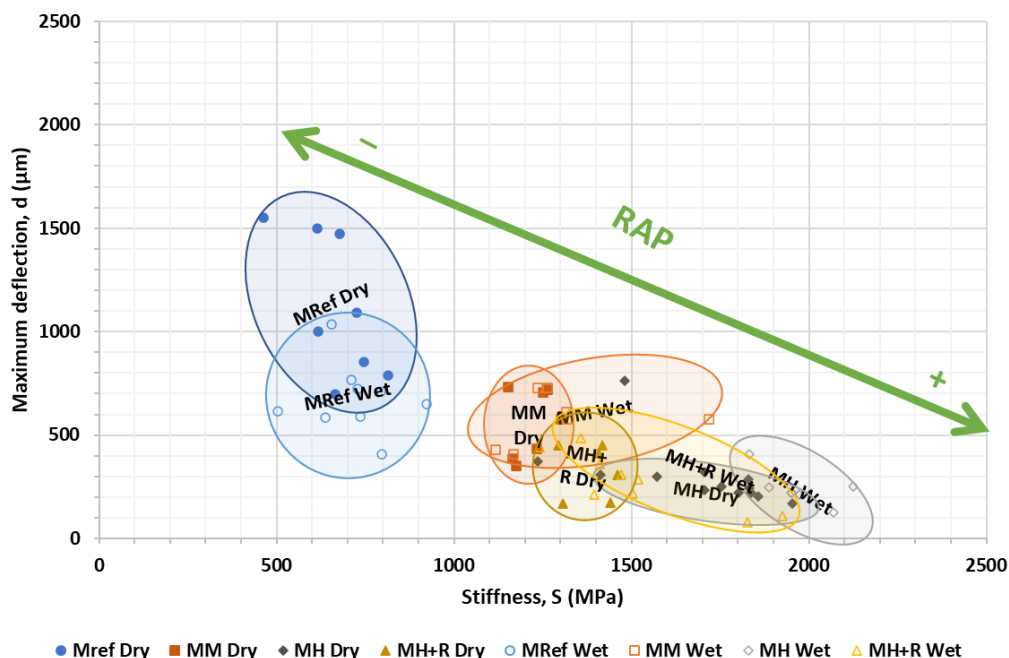
Thus, the presence of RAP was found to increase the elastic response of the mortars (which makes them more resistant against mechanical loads) but reduce its ductility (which makes them more brittle and more prone to fracture if large deformations are suffered). The use of rejuvenators could reduce the stiffness of high RAP rate mortars by around 15% and increase their ductility by around 10%, which could indicate that the aged binder contained in the RAP would have been partially reactivated.

Figure 4.1 4. Fatigue laws of the mortars studied obtained in the 3-point bending fatigue test using



the DMA.

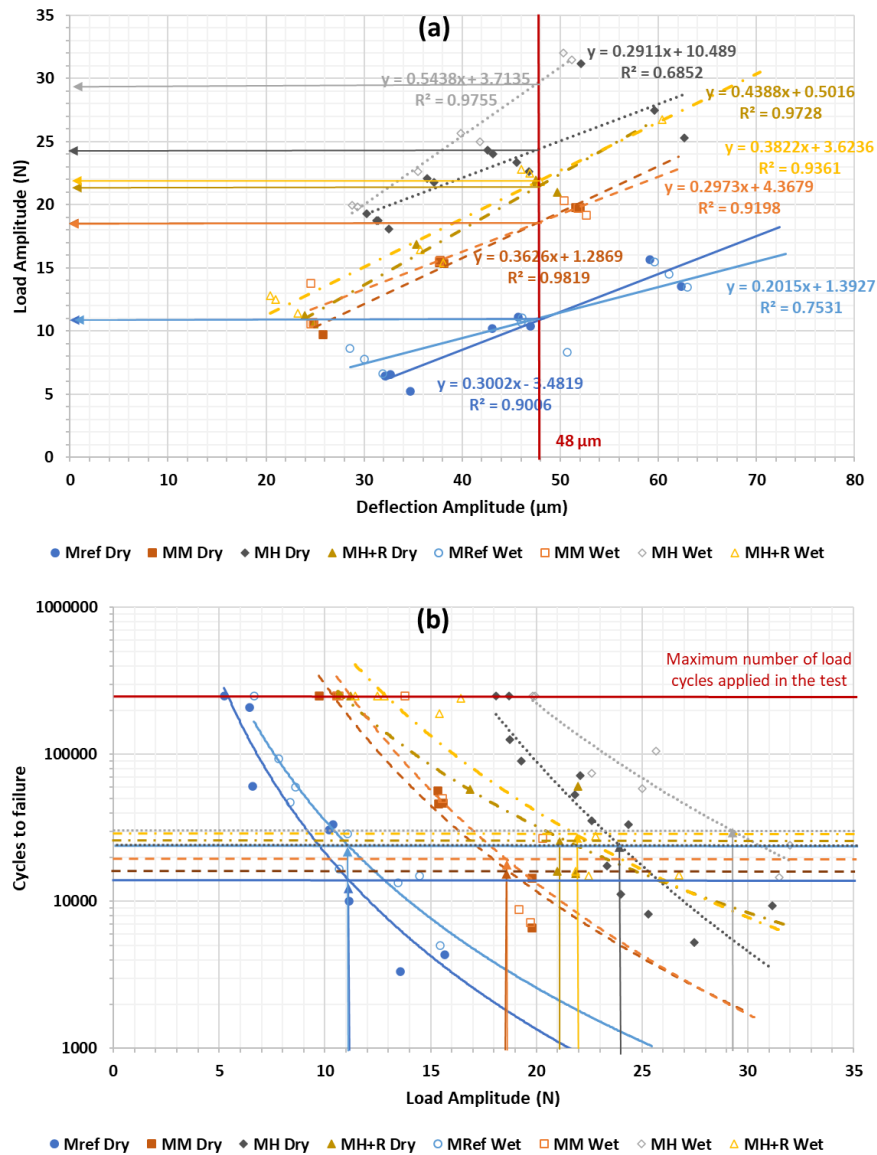
Figure 4.1 5. Results of stiffness and maximum deflection measured the different mortars studied.



Based on the results analyzed, it can be said that the presence of RAP only negatively affects the ductility of asphalt mortars, but that it can also offer mechanical advantages (as its inclusion allows for a more elastic response). Therefore, it is also interesting to analyze the mechanical performance of the mortars for a given level of deflection (Figure 4.1.11). In this respect, it is observed that in spite of the larger load amplitude needed to produce the same level of deflection as a larger quantity

of RAP is added to the mortar, the number of load cycles that can be resisted is very similar (being even slightly higher in the case of the MH and MH+R). Thus, it can be said that, despite a loss in ductility, the performance of asphalt mortars with RAP would be similar to those manufactured with virgin materials.

Figure 4.1 6. Analysis of the mechanical performance of the mortars studied: (a) load amplitude for a given displacement; (b) fatigue resistance for a given load amplitude.



4.1.5. Conclusions

This paper presents the results obtained in a research project focused on analyzing the workability, fatigue resistance, and water sensitivity of asphalt mortars manufactured with different amounts of RAP and a rejuvenator. For this purpose, the gyratory compactor and the 3-point bending fatigue test using the DMA under dry and wet conditions were implemented. On the basis of the results obtained, the following observations can be made:

- As the amount of RAP increases, the workability of the asphalt mortars was reduced. However, the use of rejuvenators would facilitate the paving and compaction of materials with high RAP quantities;
- When using an active filler (e.g., Portland cement), the use of high RAP quantities does not affect the water sensitivity of asphalt mortars;
- As RAP content is increased, asphalt mortars offer a more elastic response, and therefore, they are more resistant to fatigue loads;
- In spite of the presence of RAP reducing the ductility of the asphalt mortars, for a given deformation level, the long-term mechanical resistance (fatigue) seems to be unaffected due to its contribution in their elastic response.

4.1.6. References

1. Corriere, F.; Rizzo, A. Sustainability in road design: A methodological proposal for the drafting of guideline. *Procedia Soc. Behav. Sci.* 2012, 53, 39–48.
2. Rubio, M.C.; Moreno, F.; Belmonte, A.; Menéndez, A. Reuse of waste material from decorative quartz solid surfacing in the manufacture of hot bituminous mixes. *Constr. Build. Mater.* 2010, 24, 610–618.
3. Antunes, V.; Freire, A.C.; Neves, J. A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling. *Constr. Build. Mater.* 2019, 211, 453–469.
4. Picado Santos, L.; Baptista, A.M.; Dias Capitaio, S. Assessment of the Use of Hot Mix Recycled Asphalt Concrete in Plant. *J. Transp. Eng.* 2010, 136, 1159–1164.
5. Arámbula-Mercado, E.; Kaseer, F.; Epps Martin, A.; Yin, F.; Garcia Cucalon, L. Evaluation of recycling agent dosage selection and incorporation methods for asphalt mixtures with high RAP and RAS contents. *Constr. Build. Mater.* 2018, 158, 432–442.
6. Miguel Baptista, A.; Picado-Santos, L.G.; Capitão, S.D. Design of hot-mix recycled asphalt concrete produced in plant without preheating the reclaimed material. *Int. J. Pavement Eng.* 2013, 14, 95–102.

7. Saleh, M.; Nguyen, N.H. Effect of rejuvenator and mixing methods on behavior of warm mix asphalt containing high RAP content. *Constr. Build. Mater.* 2019, 197, 792–802.
8. Tauste, R.; Moreno-Navarro, F.; Sol-Sánchez, M.; Rubio-Gómez, M.C. Understanding the bitumen ageing phenomenon: A review. *Constr. Build. Mater.* 2018, 192, 593–609.
9. Behnood, A. Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review. *J. Clean. Prod.* 2019, 231, 171–182.
10. Huang, S.C.; Qin, Q.; Grimes, W.R.; Pauli, A.T.; Glaser, R. Influence of rejuvenators on the physical properties of RAP binders. *J. Test. Eval.* 2015, 43, 594–603.
11. Tauste, R.; Moreno-Navarro, F.; Sol-Sánchez, M.; Rubio-Gómez, M.C. The Effect of the Nature of Rejuvenators on the Rheological Properties of Aged Asphalt Binders. In *RILEM 252-CMB-Symposium on Chemo Mechanical Characterization of Bituminous Materials*; Springer: Braunschweig, Germany, 2018; pp. 220–225.
12. Moreno-Navarro, F.; Sol-Sánchez, M.; Rubio-Gómez, M.C. The effect of polymer modified binders on the long-term performance of bituminous mixtures: The influence of temperature. *Mater. Des.* 2015, 78, 5–11.
13. Presti, D.L.; del Barco Carrión, A.J.; Airey, G.; Hajj, E. Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: Binder design methodology and case studies. *J. Clean. Prod.* 2016, 131, 43–51.
14. Moreno-Navarro, F.; Sol-Sánchez, M.; Jimenez del Barco, A.; Rubio-Gómez, M.C. Analysis of the influence of binder properties on the mechanical response of bituminous mixtures. *Int. J. Pavement Eng.* 2017, 18, 73–82.
15. EN 13108-2. Bituminous Mixtures—Material Specifications—Part 2: Asphalt Concrete for very Thin Layers. Available online: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/40901d76-cd7a-464a-916c-9e1cf277ac2f/en-13108-2-2016> (accessed on 8 October 2020).
16. Bituminous Mixtures—Material Specifications—Part 5: Stone Mastic Asphalt. Available online: <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail?pid=000000000030278718> (accessed on 8 October 2020).
17. EN 13108-7. Bituminous Mixtures—Material Specifications—Part 7: Porous Asphalt. Available online: https://infostore.saiglobal.com/preview/256741893600.pdf?sku=872309_SAIG_NSAI_NSAI_2074070 (accessed on 8 October 2020).
18. EN 1426. Bitumen and Bituminous Binders—Determination of Needle Penetration. Available online: https://infostore.saiglobal.com/en-us/Standards/EN-1426-2015-345393_SAIG_CEN_CEN_790099/ (accessed on 8 October 2020).
19. EN 1427. Bitumen and Bituminous Binders—Determination of the Softening Point—Ring and Ball Method. Available online: <https://infostore.saiglobal.com/preview/is/en/2015/i.s.en1427-2015.pdf?sku=1814087> (accessed on 8 October 2020).

20. Cavalcanti De Sousa, P. Automated Protocol for the Analysis of Dynamic Mechanical Analyzer Date from Fine Aggregate Asphalt Mixes. Ph.D. Thesis, Texas A&M University, College Station, TX, USA, 2010.
21. EN 12697-31. Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt-Part 31: Specimen Preparation by Gyratory Compactor. Available online: <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=00000000030154393> (accessed on 8 October 2020).
22. EN 12697-6. Bituminous Mixtures. Test Methods for Hot Mix Asphalt-Part 6: Determination of Bulk Density of Bituminous Specimens. Available online: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/25d7a9c5-15fd-4242-be8c-1856a7a3a049/en-12697-6-2012> (accessed on 8 October 2020).
23. Canet, J.M. Resistencia de Materiales y Estructuras; Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería: Barcelona, Spain, 2012.
24. Farooq, M.A.; Mir, M.S.; Sharma, A. Laboratory study on use of RAP in WMA pavements using rejuvenator. Constr. Build. Mater. 2018, 168, 61–72.
25. Silva, H.M.; Oliveira, J.R.; Jesus, C.M. Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving? Resour. Conserv. Recycl. 2012, 60, 38–48.

4.2. INFLUENCE OF TYPE OF FILLER AND BITUMEN ON THE MECHANICAL PERFORMANCE OF ASPHALT MORTARS²

4.2.1. Abstract

This article presents a new methodology of analysis based on a fast-running experimental procedure to characterize the mechanical response of asphalt mortars in terms of stiffness, ductility, and fatigue resistance. This was achieved using the DMA (Dynamic Mechanical Analyzer) three-point bending configuration. The study was carried out by considering the employment of different types of fillers such as cement and CaCO₃ and different types of binders such as conventional asphalt binder (B35/50) or modified polymer-modified bitumen (PMB 25/55–65). From the results of this study, the filler was found to have a greater influence on the stiffness and ductility of the asphalt material, while bitumen had a higher effect on the fatigue life of the asphalt mortar. Fatigue life was observed to increase with the use of a polymer-modified binder, while a lower degree of permanent deformation and higher bearing capacity achieved by the use of cement instead of calcium carbonate as active fillers.

Keywords: fine aggregate matrix; filler; polymer-modified bitumen; asphalt mortar; asphalt mixture; fatigue performance

4.2.2. Introduction

The continual increases in traffic levels, coupled with greater environmental burdens such as more extreme climatic events due to climate change, have led to the need to design asphalt mixtures with a higher performance level [1]. Moreover, current investments in road networks in developed countries have been evolving toward the preservation of existing infrastructures rather than the construction of new ones [2]. This has led to a need to optimize existing resources in order to achieve solutions that can improve the performance of roads and to guarantee their future durability. To achieve this, it is fundamental to find new tools that can help to improve the design of asphalt mixtures. This should be accomplished in a manner in which designs could be more agile, the use of new materials could still be explored, and the limited resources available can be optimized. An adequate selection of the materials and asphalt mixtures used in the construction of road structures exerts a fundamental role in the performance, durability, and functionality of the transport infrastructure. An optimal asphalt mixture design would guarantee sufficient bearing capacity, enough flexibility to counteract the initiation of cracking at low stress levels [3], a good interaction between the components [4], and the capacity of resist fatigue associated with both traffic loads and thermal stresses [5]. Fatigue phenomena could give way to the progressive cracking and breakage of the asphalt mixture layers of the pavement structure, which is one of the main reasons behind structural failure in pavements [6]. There are several tests for evaluating the fatigue

² El trabajo en este capítulo se basa en la publicación: Tauste-Martínez, R.; Hidalgo, A.E.; García-Travé, G.; Moreno-Navarro, F.; Rubio-Gómez, M.d.C. *Influence of Type of Filler and Bitumen on the Mechanical Performance of Asphalt Mortars*. *Materials* 2022, 15, 3307. <https://doi.org/10.3390/ma15093307>

resistance at the asphalt mixture level; however, alternative methods could be useful in order to explore the properties of material via fewer testing steps. In turn, this would also provide a quicker understanding of the material needing lower investment costs without compromising the representativeness of the mechanical behavior described. In this sense and in spite of its relative low percentage among the asphalt mixture, the materials conforming the Fine Aggregates Matrix (FAM) (i.e., bitumen, the finest aggregate fraction of asphalt mixture and filler) are responsible for providing appropriate granular material cohesion [7]. FAM (or asphalt mortar) also conditions the viscoelastic response of the entire mixture and, with it, its resistance to fatigue and cracking [8]. In addition, both the filler and binder are, despite its low proportion, the more expensive constituent materials in the mixture (especially if active fillers or polymer-modified bitumen are employed). Therefore, it is important to know, as accurately as possible, the actual influence of the employed asphalt binder (penetration or modified) and filler type (natural or active) on the mechanical response of the mixtures [9]. Different studies have analyzed the basic physical-chemical characteristics of the filler or rheologic performance at asphalt binder level [10,11]. Nevertheless, this kind of analyses lack the consideration of the interaction between asphalt, filler, and the finest part of the aggregates as a fundamental factor conditioning the mechanical behavior of asphalt materials. For this reason, the analysis of an intermediate level such as FAM characterization could be helpful in precisely determining the repercussions of using different kinds of fillers and bitumen's in phenomena such as fatigue cracking. This is possible by studying it at the scale that most conditions the viscoelastic response of the material. There are several studies [12–14] that have employed this kind of analysis as a method of characterizing the fatigue resistance of asphalt mixtures. These methods extend the principle used in the characterization of bitumen rheology and make use of samples that are usually cylindrical, which are tested under torsion. Following this, different oscillatory sweep tests (strain sweep, time sweep, relaxation, linear amplified sweep (LAS), creep, and recovery, etc.) are carried out at different frequencies and temperatures to characterize the viscoelastic properties of the material, its recovery capacity, and fatigue resistance [15]. According to their results, the analysis of asphalt mortars has been shown to be a viable method since it deals with the problem of the heterogeneous composition of asphalt mixtures through the characterization of a more homogeneous material (i.e., FAM) [16,17]. This makes it possible to examine the precise influence of different fillers or even polymer modified binders, since it enables the analysis of the maximum specific surface of asphalt mixtures. At this scale, a higher concentration of binder is anticipated and a sensitivity closer to the entire mixture can be achieved [18,19]. Nonetheless, despite this, there is still a certain lack of a common methodology regarding fatigue characterization (with different tests and failure criterion considered) that can provide confidence in this type of analysis. In turn, this limits the spread of its use as a tool in the design for asphalt mixtures and the evaluation of different materials related to their mastics. Therefore, the aim of this study was to analyse the influence of the type of filler and bitumen on the stiffness, ductility, and fatigue resistance. This was achieved through the implementation of a methodology of analysis based on 3 point-bending DMA (Dynamic Mechanical Analyzer) fatigue characterization for asphalt mortars (FAM)

4.2.3. Materials and Methods

4.2.3.1. Materials

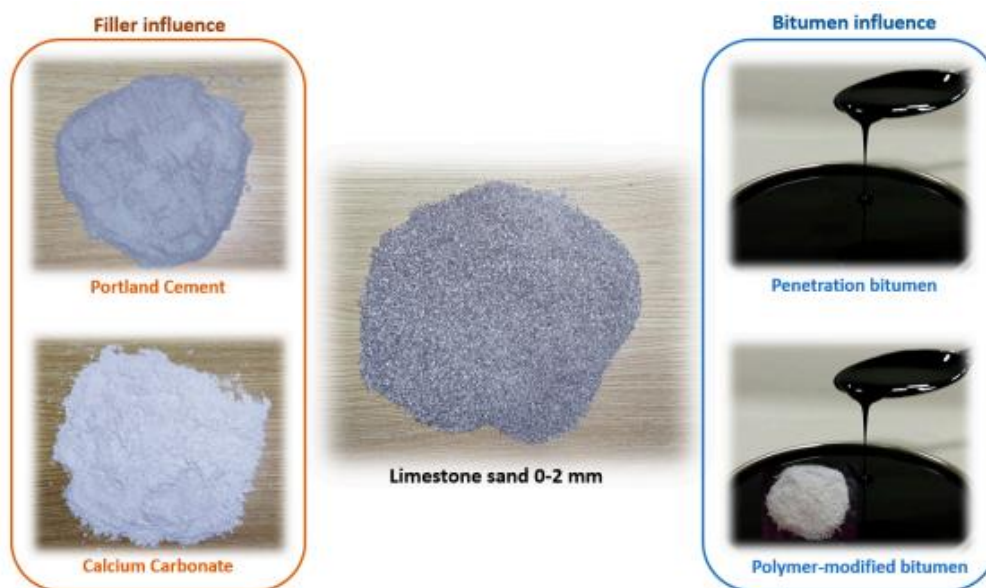
Four asphalt mortars were studied (Table 4.2 1) to establish the effect of the type of filler and bitumen on their mechanical response. All of them were designed based on the properties of the materials employed in BBTM mixtures (EN 13108-2) [20]. This mixture type (commonly used at higher traffic levels) requires the use of active fillers and polymer modified bitumen being the mortar fraction, which is a key role on its mechanical response.

Table 4.2 1. Composition of the asphalt mortars studied.

Components	Mortar with Cement + Penetration Bitumen (M1)	Mortar with CaCO ₃ + Penetration Bitumen (M2)	Mortar with Cement + Modified Bitumen (M3)	Mortar with CaCO ₃ + Modified Bitumen (M4)
Asphalt binder B35/50 (% over the total weight of the mortar)	8.0	8.0	-	-
Asphalt bitumen PMB 25/55–65 (% over the total mortar weight)	-	-	8.0	8.0
Limestone Sand (% over the total weight of the mortar)	64.4	64.4	64.4	64.4
Filler: Portlant Cement (% over the total mortar weight)	27.6	-	27.6	-
Filler: Calcium carbonate (CaCO ₃) (% over the total mortar weight)	-	27.6	-	27.6

To establish the influence of the filler employed, two mortars were manufactured using Portland cement as an active filler, and the other two were manufactured using calcium carbonate (CaCO₃). Similarly, two mortars were manufactured using a conventional penetration bitumen (B35/50) and the other two mortars were manufactured using a polymer-modified bitumen (PMB 25/55–65) to analyse the influence of this type of bitumen (Figure 4.2 1).

Figure 4.2 1. Components of the asphalt mortars studied.



Mortars were composed of 64.4% of limestone sand (washed to eliminate any filler particles), 27.6% of filler, and 8.0% of bitumen over the total asphalt mortar weight. The amount of binder corresponding to the mortar fraction was calculated according to the methodology employed in other studies [7,14,19]. The main characteristics of these materials are summarized in Tables 4.2 2-4.

Table 4.2 2. Characteristics of the sand employed.

Parameter	Sieve (mm)	Percentage of material passing (%)
Granulometry (EN 933-1) [21]	2	100
	0.5	18
	0.063	0
Sand equivalent (EN 933-8) [22]		77.0
Density (Mg/m ³) (EN 1097-6) [23]		2.77
Water absorption (%) (EN 1097-6) [24]		0.88

Table 4.2 3. Characteristics of the fillers employed.

Property	Sieve (mm)	Percentage of material passing (%)	
		Portland Cement	Calcium Carbonate
Granulometry (EN 933-1)	2	100	100
	0.5	100	100
	0.125	100	100
	0.063	96.0	94.0
Density (kg/cm ³) (EN 1097-3, Annex A) [24]		2941	2770

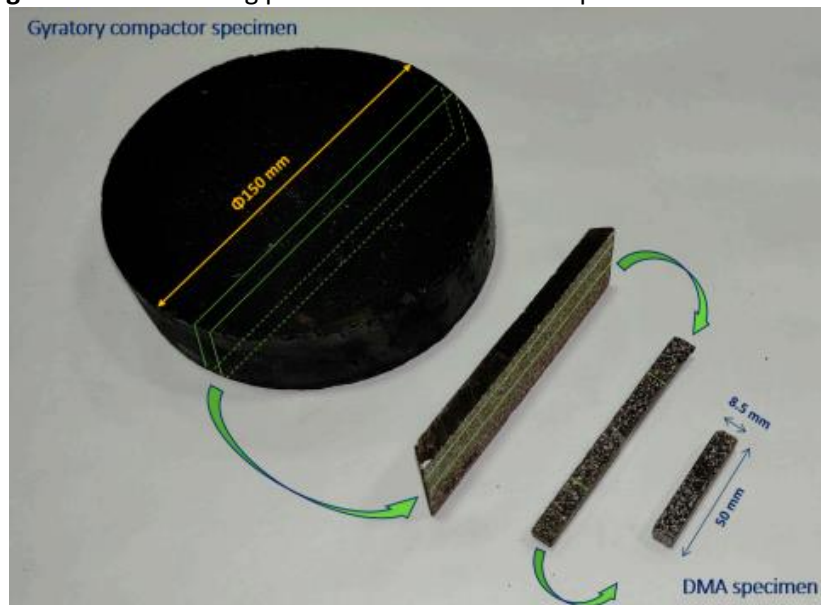
Table 4.2 4. Properties of the binders evaluated in the study

Parameter	B 35/50	PMB 25/55-65
Binder Penetration (dmm) (EN 1426) [25]	38	32
Softening point temperature °C (EN 1427) [26]	54	65

The mixing process between the different components was carried out at 165 °C of temperature. After that, cylindrical specimens with a diameter size of 150 mm were compacted using a gyratory compactor (EN 12697-31) [27] at a temperature 160 °C until reaching a void content near to 0% (which gives way to specimen heights round 40 mm). By reducing to the maximum, the air voids present in the material, the adhesiveness between aggregates and binder can be analyzed more precisely [14]. Afterward, specimens were sawn using a precision coordinate cutting saw to obtain 8.5 × 8.5 × 50 mm prismatic samples. These would be used in the DMA (Dynamic Mechanical Analyser) characterization without the need to be coupled to the device as in other FAM characterization torsion tests. Figure 4.2.2 shows the aspect of the specimens manufactured and Table 5 shows the density of the different mortars manufactured.

Table 4.2 5. Density of the asphalt mortars tested.

Components	M1	M2	M3)	M4
Apparent Density (kg/m³) (EN 12697-6) [28]	2453	2338	2423	2373

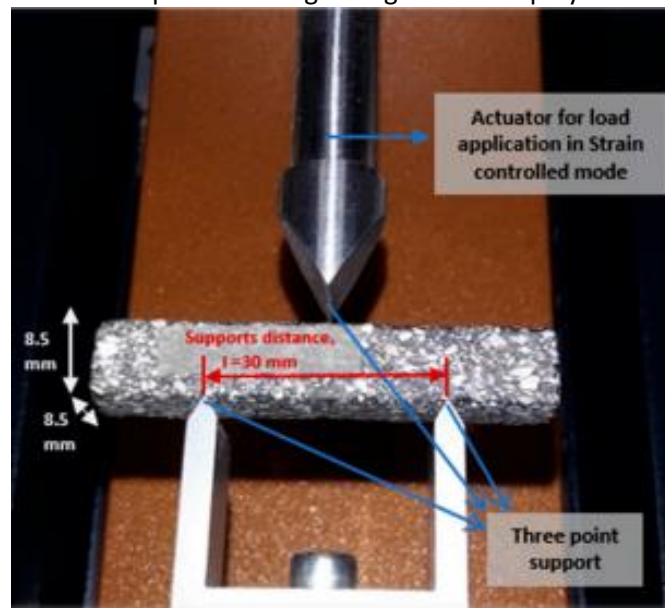
Figure 4.2 2. Obtaining process of the mortar samples used in DMA tests.

4.2.3.2. Testing Plan

This investigation makes use of a new methodology of analysis that allow the assessment of the influence of using different types of active filler and asphalt binder in the mechanical performance of asphalt materials. By applying this, it is possible not only to determine the basic characteristics (such as bearing capacity, flexibility, or fatigue resistance) that condition the mechanical performance of asphalt mortars or mixtures, but we can also establish the relation between them and the changes induced by changes in the asphalt mortars composition. This will enhance the understanding of the influence of different fillers and bitumen types in the mortars helping in the improvement of the design of asphalt materials

In order to achieve this, a three-point bending test (Figure 4.2.3) was performed with DMA Discovery HR 30™ equipment from TA Instruments™ (New Castle, DE, USA) on the prismatic specimens previously referred to. The use of this type of configuration instead of the most commonly used torsional one [12,17,18] allows bringing the material characterization closer to the methods commonly used in fatigue characterization at the level of mixtures such as UGR-FACT [29], 3-point fatigue test [30], and 4 point-bending tests [31], among others. This new test allows the assessment of ductility, stiffness, and the fatigue response of the mortar, enhancing the comprehension about the influence of the finest fraction of aggregates and mastic components on the mechanical resistance of the material [19].

Figure 4.2 3. Layout of the three-point bending configuration employed in mortar characterization.



Based on these considerations, for each type of mortar, 9 specimens were tested divided into 3 sub-groups of 3 samples. The test of each sub-group was performed until reaching fatigue cracking failure at 3 different strain amplitudes: 40, 60, and 80 μm (DMA in strain-controlled mode). The load (of sinusoidal character) was applied at a frequency of 5 Hz and at a temperature of 35 °C. This

temperature allows obtaining adequate test durations without compromising the adequate characterization of the material. In addition, the material is tested with demanding conditions in relation to fatigue response. The different values obtained were then used to define fatigue laws that helps in understanding the behavior of the material against this phenomenon in different load conditions.

To establish the failure cycle, this methodology does not make use of a reduction in modulus value (usually between 40 and 60%), the definition of failure from the maximum phase angle value, or the establishment of different indices based on viscoelastic models as used in other studies [13,16]. Instead, image control was employed during all tests by making use of the live camera integrated in the equipment. The appearance of macro-cracks in the specimens along with the control of the evolution of the maximum force registered in each load cycle (a sharp drop in this force indicated the apparition of the macro-crack) makes it possible to examine the failure cycle (Figure 4.2 4). Alternatively, a maximum number of 250,000 cycles was established as failure criteria in cases where cracking did not fully develop beforehand. This test allows the assessment of ductility, bearing capacity, and fatigue response of the material. These parameters are related to the performance of the FAM components within the asphalt mixture and condition and its durability. In this fashion, the mechanical behavior of asphalt mortars can be studied by using the different parameters derived from the analysis of the three point-bending test [14]:

- Stiffness (S). This first parameter evaluates the bearing capacity of the mortar, a key element in ensuring that the mixture has adequate resistance to permanent deformations [32]. It is defined as the relation between the force applied and the deflection induced in the mortar specimen after 1000 cycles. Stiffness uses the Young's Modulus obtained from Equation (1) [33], and it is a measurement of the visco-elastic behavior of the mortar (as it becomes higher, the mortar behavior becomes more elastic). This is possible because all tests share same temperature and load conditions (amplitude and frequency):

$$S = \frac{F \cdot l^3}{4 \cdot d \cdot b \cdot h^3} \quad (1)$$

where F is the maximum force applied in the load cycle 1000 (at this cycle, the sample is considered undamaged and within the viscoelastic range); l is the distance between the supporters; d is the deflection displacement measured in the cycle 1000; b is the width of the sample; and h is the sample height.

- Maximum deflection (dmax). It is defined as the accumulated deflection in the specimen before the macro-crack appearance (Figure 4.2 5). This parameter measures the ductility (ability to deform before cracking) of the material analyzed, a property related to fatigue resistance, which is particularly important at low temperatures [34]. As the maximum deflection becomes higher, mortar ductility also becomes higher.

Figure 4.2 4. Example of the maximum force development and image monitoring in the fatigue 3-point bending test in DMA.

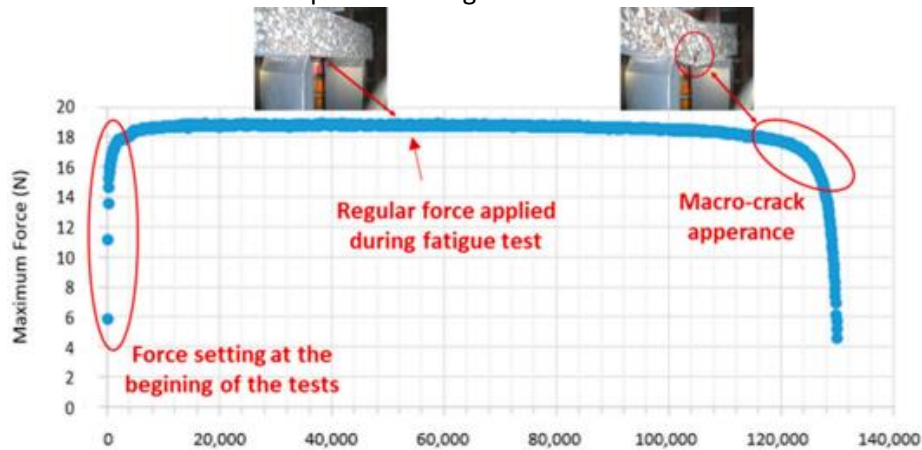
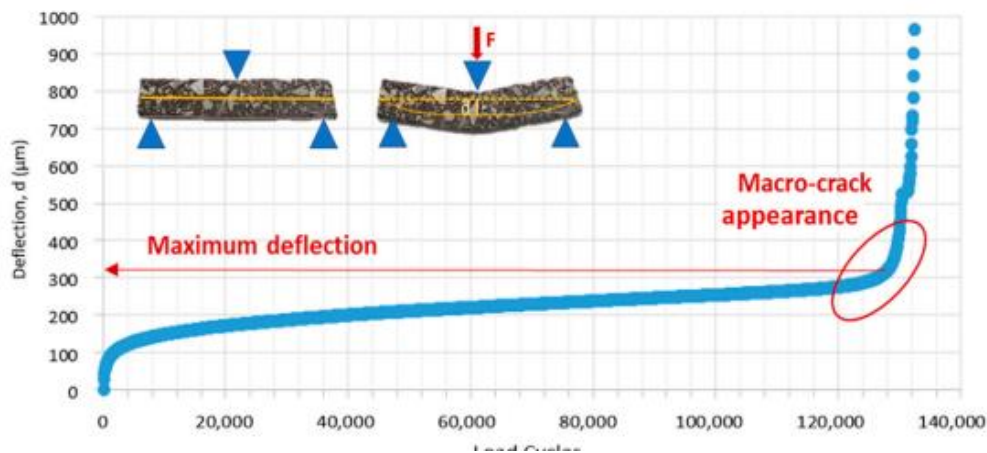


Figure 4.2 5 Deflection (d) registered during 3-point bending fatigue tests



- Fatigue life (N_f). This parameter is defined by the total number of cycles applied in the sample before the appearance of a macro-crack. The parameter is a direct measurement of the fatigue resistance of the mortars (as this parameter increases, the resistance of the material also increases).

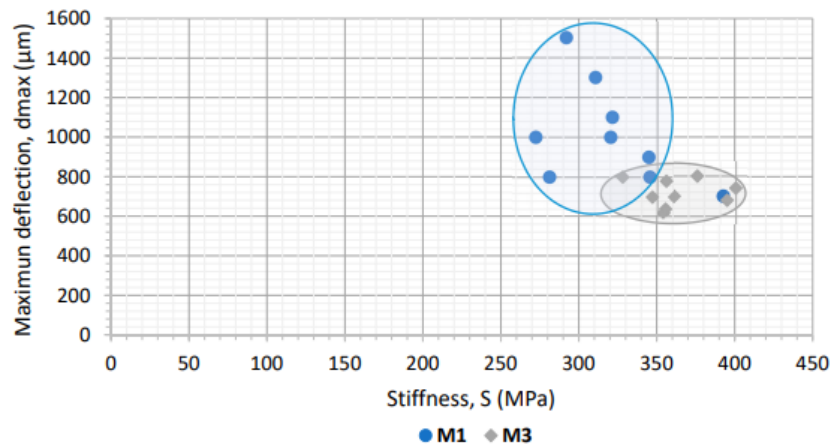
4.2.4. Results and Discussion

Based on the methodology previously described, the results presented enable the characterization of the influence of both the type of filler and binder on the behavior of asphalt mortars.

4.2.4.1. Stiffness (S) and Ductility (dmax)

The following figures present the values of Stiffness and Maximum deflection (previously defined) obtained from the nine samples tested for each mortar at different levels of load. The representation of these values allows obtaining a general idea of the mechanical behavior of the material and the differences that occur due to changes in its composition in terms of bearing capacity and flexibility. Figures 4.2 6 and 4.2 7 present the stiffness and deflection results for the Portland cement and calcium carbonate active fillers, respectively. The two binders are also represented in these figures (both the penetration or polymer-modified bitumen). The representation of these two parameters makes it possible to differentiate the mechanical response of the asphalt mortars manufactured with different active filler materials.

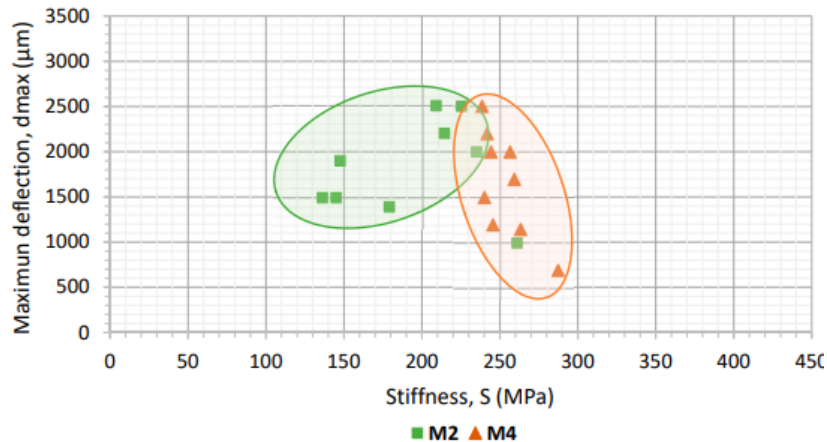
Figure 4.2 6 Results of stiffness and maximum deflection measured the mortars with cement active filler. M1 conventional binder M3 modified binder



In terms of stiffness, mortars made with the cement filler (Figure 4.2 6) had values between 300 and 400 MPa, which were slightly higher in the case of the M3 mortar (made with the polymer-modified binder). In the case of calcium carbonate filler (Figure 4.2 7), a similar behavior was observed for both types of binder. However, the bearing capacity was found to be lower with values between 150 and 250 MPa, which is always slightly higher for the mortar manufactured with modified bitumen (PMB 25/55–65). Regarding ductility, despite the type of bitumen employed, it becomes clear that the mortars manufactured with CaCO_3 experienced a higher value of deflection. Therefore, it is more flexible than those that incorporate cement as an active filler. The use of polymer modified bitumen tends to slightly reduce the flexibility of the material following a similar trend to what was observed for stiffness. According to these results, both the stiffness and ductility proved to be sensitive to the filler and bitumen typologies employed. It was also possible to demonstrate the utility of this kind of analysis to evaluate their influence in the bearing capacity and the resistance of the asphalt mortars to both cracking and permanent deformations. In summary, mortars manufactured with cement filler (Mortars M1 and M3) were found to be more rigid and less ductile compared to mortar specimens made with CaCO_3 filler (M2 and M4). The specimens

manufactured with conventional binder (B35/50, M1 and M2) were more flexible and less rigid than the ones made using a polymer-modified binder (M3 and M4).

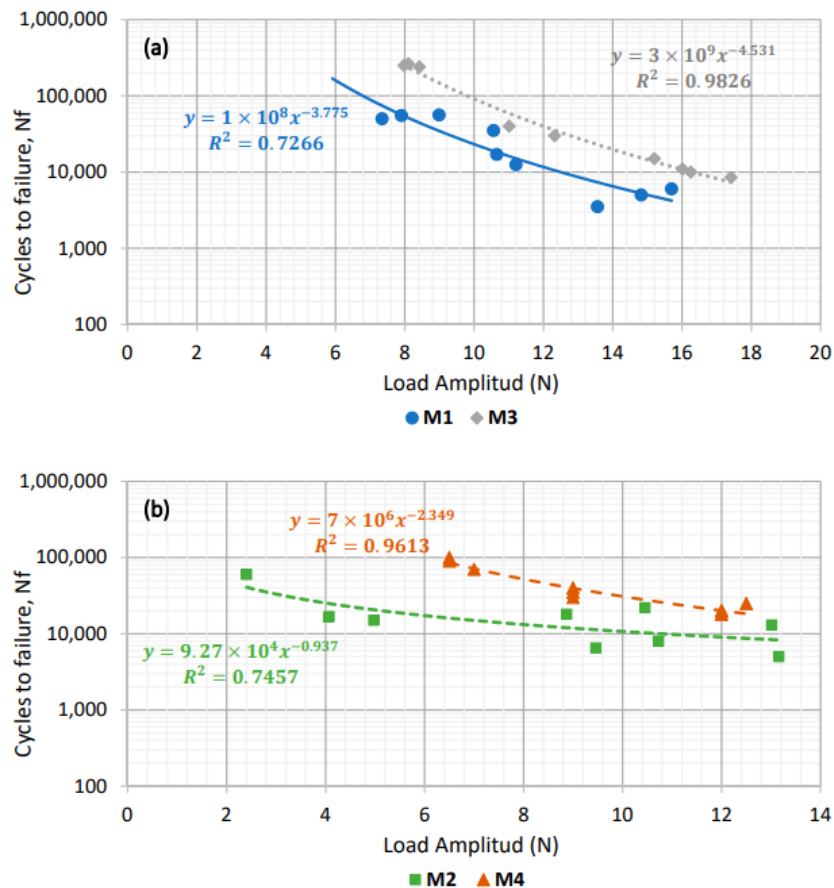
Figure 4.2 7 Results of stiffness and maximum deflection measured the mortars with CaCO₃ active filler. M2 conventional binder M4 modified binder.



4.2.4.2. Fatigue Life (Nf)

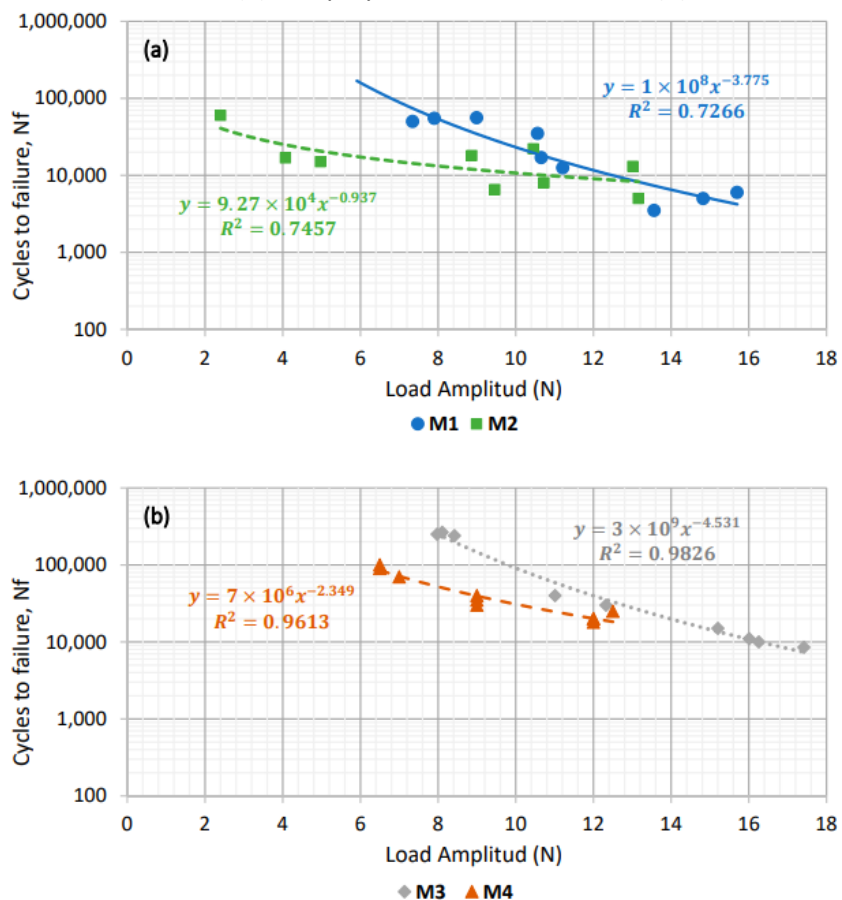
In this section, the fatigue life (Nf) values obtained in the different mortars for each loading condition were used to construct fatigue laws. For each specimen, the applied load value (corresponding to the required deformation level) is plotted against the number of cycles that was resisted until macro-crack appearance. A potential regression of these values allows obtaining a law describing the fatigue behavior of the material against different levels of solicitation. Figure 4.2 8 shows the fatigue laws of those asphalt mortars manufactured with the same type of filler. In this manner, Figure 4.2 8a displays the results of mortars with cement as active filler (M1 and M3), while Figure 8b presents those fabricated with CaCO₃ (M2 and M4). This makes it possible to compare the influence of the asphalt binder on the fatigue response of these materials. The differences found in fatigue resistance for the cement mortars (Figure 4.2 8a) show that the mortar manufactured using a B 35/50 penetration bitumen (M1) has a significantly lower (around a 500% less) fatigue life than the mortar that employed polymer-modified bitumen (M3). Comparing the mortars that used CaCO₃ as a filler (Figure 4.2 8b), the differences between the two asphalt binder typologies was slightly less significant but still visible. The mortar that used the modified bitumen (M4) was found to have a higher fatigue resistance than the one employing a conventional penetration binder (M2). These results show that this kind of analysis is sensitive enough to distinguish the effect of different kinds of asphalt binders when using a determined kind of filler in asphalt mortar formulation. In both cases, it becomes clear that the use of polymer-modified bitumen helps to extend the fatigue life of these mortars. This is in accordance with other studies [19,35,36] and with the previous results regarding increased stiffness and lower deflection (Figures 4.2 6 and 4.2 7). These are indicative of the increased cohesion between the asphalt mortar components that contribute to enhancing fatigue resistance in mortars.

Figure 4.2 8. Comparison between types of bitumen for mortars manufactured with Portland cement (a) and CaCO₃ (b).



Similarly, Figure 4.2 9 analyses the influence of the filler type on the fatigue response of asphalt mortars, comparing the fatigue laws of the mortars manufactured with the same kind of asphalt binder: B 35/50 (M1 and M2, Figure 4.2 9a) or PMB 25/55–65 (M3 and M4, Figure 4.2 9b). Considering that, as seen previously, the mortars using polymer-modified bitumen in its formulation reached a higher fatigue life. Here, it can be observed that, regardless the kind of bitumen used, the mortars manufactured with cement (M1 and M3) have higher fatigue resistance than those that employed CaCO₃ as active filler (M2 and M4). The differences between the fatigue life of the mortars manufactured with different types of filler becomes higher as the load amplitude tested is lower. This could indicate that beyond a certain level of load, the influence of the typology of bitumen would be more significant than the type of filler in relation with fatigue resistance. These results are again in accordance with those found in Figures 4.2 6 and 4.2 7. This is particularly true when considering that a higher degree of stiffness (such as the one obtained through the use of cement) leads to an extended fatigue life, as it was also pointed out by previous studies [14,37].

Figure 4.2 9. Comparison between types of active filler for mortars manufactured with penetration binder (a) and polymer-modified bitumen (b).



Finally, in order to better distinguish the influence of the of filler and bitumen typologies, Figure 4.2 10 presents the relative maximum deflection (d_{max}) or ductility, stiffness (S), and fatigue life (N_f) together. For each one of these parameters, a ranking between the different mortars was established by assigning a value on the scale 1 to 4 to each one (where 1 is the lowest value and 4 is the largest value). Then, the values were represented in the graph. The ranking is settled according to the average value of each parameter defined at the load of 10 N, as observed in Table 4.2 6.

Figure 4.2 10. Relationship between maximum deflection, stiffness and fatigue life of the different mortars studied.

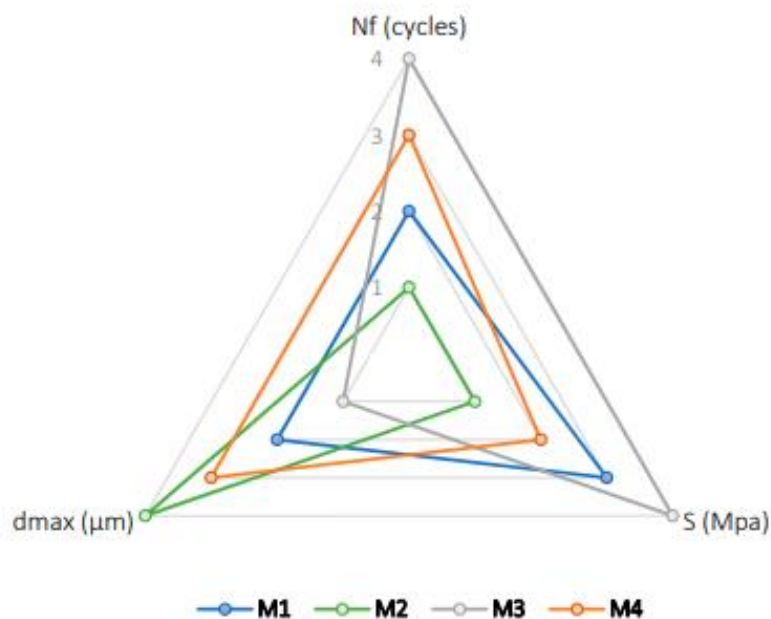


Table 4.2 6 Average values obtained at a load level of 10 N employed in the construction of the parametric ranking

Components	M1	M2	M3	M4
Nf, Average (cycles)	21 500	8 125	22 750	20 750
Nf, Standard deviation (cycles)	1 905.9	3 473.1	1 283.1	2 986.1
Nf, Ranking	2	1	4	3
S, Average (Mpa)	311.3	218.5	353.6	245.1
S, Standard deviation (Mpa)	16.6	34.2	19.57	8.0
S, Ranking	3	1	4	2
dmax, Average (μm)	1 200	1 850	755	1 800
dmax, Standard deviation (μm)	264.6	768.1	77.2	571.5
dmax, Ranking	2	4	1	3

From this figure, it is possible to observe that the design component that most contributes to a higher fatigue life (Nf) is the typology of bitumen employed since mortars manufactured with polymer-modified bitumen (M3 and M4) are the ones with larger fatigue resistance. Regarding the other two parameters, ductility (dmax) and stiffness (S), these manifested an inverse result. Specifically, the higher the rigidity, the lower the maximum deflection. Regardless of this, both parameters were found to be more affected by the type of filler used in the design of the asphalt mixture. Mortars with cement as active filler (M1 and M3) were more rigid than those manufactured using CaCO₃ (M2 and M4). Therefore, the former would have a higher bearing capacity and permanent deformation resistance, whereas the latter would present a higher ductility and would be more flexible.

4.2.5. Conclusions

This study centers on the application of a new methodology of analysis of asphalt mortars based on 3-point bending fatigue tests performed with DMA equipment. This was used to establish the influence of different types of active filler and asphalt binder on their mechanical performance. According to the results showed, some conclusions can be reached:

- The methodology presented made it possible to identify the effect of the filler on the stiffness and ductility of asphalt mortars, both being parameters that condition the mechanical performance of asphalt mixtures. In this case, it can be observed how mortars manufactured with Portland cement are more rigid and have lower deflection (d_{max}) in comparison with $CaCO_3$ mortars.
- These two parameters are also affected by the bitumen type employed. It was possible to distinguish a slightly more rigid and less flexible behavior for the polymer modified binder regardless of the filler type employed.
- The highest fatigue resistance was achieved through the employment of polymer modified binder regardless of the filler used. Nonetheless, when the same kind of bitumen (either penetration or modified) was employed, the higher degree of stiffness of cement mortars helps achieve larger fatigue lives than mortars manufactured with $CaCO_3$.
- It was possible to establish that the typology of bitumen used will affect, to a greater extent, the fatigue life of asphalt materials. Meanwhile the stiffness, ductility, and the properties that depend on them (bearing capacity, permanent deformation resistance, flexibility, etc.) will be conditioned more by the kind of filler employed.

According to the results found, it can be concluded that using asphalt mortars and the test protocol based on DMA 3-point bending configuration makes it possible to assess the influence of different types of filler and bitumen on the mechanical performance of these materials. This will help simplify its design and characterization in a manner that requires fewer resources.

4.2.6. References

1. Nicodème, C.; Diamandouros, K.; Diez, J.; Durso, C.; Arampidou, K.; Nuri, A.K. Road Statistics Yearbook 2017; European Union Road Federation: Brussels, Belgium, 2017.
2. Gould, E.; Parkman, C.; Buckland, T. The Economics of Road Maintenance; RAC Foundation: London, UK, 2013.
3. Loria, L.; Sebaaly, P.E.; Hajj, E.Y. Long-Term Performance of Reflective Cracking Mitigation Techniques in Nevada. Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board 2008, 2044, 86–95.

4. Presti, D.L.; Carrión, A.J.D.B.; Airey, G.; Hajj, E. Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: Binder design methodology and case studies. *J. Clean. Prod.* 2016, 131, 43–51.
5. Pérez-Jiménez, F.; Valdes, G.; Botella, R.; Miró, R.; Martínez, A. Evaluación del proceso de fatiga de mezclas asfálticas mediante un nuevo procedimiento cíclico de barrido de deformaciones: EBADE. *Rev. Constr.* 2011, 10, 55–65.
6. Moreno-Navarro, F.; Sol-Sánchez, M.; Rubio-Gámez, M.C. The effect of polymer modified binders on the long-term performance of bituminous mixtures: The influence of temperature. *Mater. Design* 2015, 78, 5–11.
7. De Sousa, P.C. Automated Protocol for the Analysis of Dynamic Mechanical Analyzer Data from Fine Aggregate Asphalt Mixes. Ph.D. Thesis, Texas A & M University, College Station, TX, USA, 2010.
8. Moreno-Navarro, F.; Sol-Sánchez, M.; Del Barco, A.J.; Rubio-Gámez, M. Analysis of the influence of binder properties on the mechanical response of bituminous mixtures. *Int. J. Pavement Eng.* 2015, 18, 73–82.
9. Rahman, A.; Ashik, S.; Kumar, S.; Sazzad, Q. Effect of fillers on bituminous paving mixes: An experimental study. *J. Eng. Sci.* 2012, 3, 121–127.
10. Kim, Y.R. Mechanistic Fatigue Characterization and Damage Modeling of Asphalt Mixtures. Ph.D. Thesis, Texas A&M University, College Station, TX, USA, 2003.
11. Underwood, B.; Kim, Y.R. Experimental investigation into the multiscale behaviour of asphalt concrete. *Int. J. Pavement Eng.* 2011, 12, 357–370.
12. Nabizadeh, H.; Haghshenas, H.F.; Kim, Y.-R.; Aragão, F.T.S. Effects of rejuvenators on high-RAP mixtures based on laboratory tests of asphalt concrete (AC) mixtures and fine aggregate matrix (FAM) mixtures. *Constr. Build. Mater.* 2017, 152, 65–73.
13. Ding, J.; Jiang, J.; Ni, F.; Dong, Q.; Zhao, Z. Correlation investigation of fatigue indices of fine aggregate matrix (FAM) and asphalt mixture containing reclaimed asphalt pavement materials. *Constr. Build. Mater.* 2020, 262, 120646.
14. Hidalgo, A.; Moreno-Navarro, F.; Tauste, R.; Rubio-Gámez, M. The Influence of Reclaimed Asphalt Pavement on the Mechanical Performance of Bituminous Mixtures. An Analysis at the Mortar Scale. *Sustainability* 2020, 12, 8343.
15. Suresha, S.; Ningappa, A. Recent trends and laboratory performance studies on FAM mixtures: A state-of-the-art review. *Constr. Build. Mater.* 2018, 174, 496–506.
16. Masad, E.; Zollinger, C.; Bulut, R.; Little, D.; Lytton, R.; Khalid, H.; Davis, H.; Scarpas, T.; Fini, E.; Guarín, A. Characterization of HMA moisture damage using surface energy and fracture properties. In *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists- Proceedings of the Technical Sessions*. Assoc. Asph. Paving Technol. 2006, 75, 713–754.

17. Sadeq, M.; Al-Khalid, H.; Masad, E.; Sirin, O. Comparative evaluation of fatigue resistance of warm fine aggregate asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* 2016, 109, 8–16.
18. Im, S.; You, T.; Ban, H.; Kim, Y.-R. Multiscale testing-analysis of asphaltic materials considering viscoelastic and viscoelastic deformation. *Int. J. Pavement Eng.* 2015, 18, 783–797.
19. Tauste-Martínez, R.; Moreno-Navarro, F.; Sol-Sánchez, M.; Rubio-Gámez, M.C. Multiscale evaluation of the effect of recycled polymers on the long-term performance of bituminous materials. *Road Mater. Pavement Des.* 2021, 22, S99–S116.
20. EN 13108-2; Bituminous Mixtures-Material Specifications—Part 2: Asphalt Concrete for Very Thin Layers. AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación: Madrid, Spain, 2007.
21. EN 933-1; Tests for Geometrical Properties of Aggregates—Part 1: Determination of Particle Size Distribution-Sieving Method. AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación: Madrid, Spain, 2012.
22. EN 933-8; Tests for Geometrical Properties of Aggregates—Part 8: Assessment of Fines-Sand Equivalent Test. AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación: Madrid, Spain, 2012.
23. EN 1097-6; Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates—Part 6: Determination of Particle Density and Water Absorption. AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación: Madrid, Spain, 2014.
24. EN 1097-3; Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates—Part 3: Determination of Loose Bulk Density and Voids. AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación: Madrid, Spain, 1999.
25. EN 1426; Bitumen and Bituminous Binders-Determination of Needle Penetration. AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación: Madrid, Spain, 2015.
26. EN 1427; Bitumen and Bituminous Binders-Determination of the Softening Point—Ring and Ball Method. AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación: Madrid, Spain, 2015.
27. EN 12697-31; Bituminous Mixtures-Test Methods—Part 31: Specimen Preparation by Gyratory Compactor. AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación: Madrid, Spain, 2020.
28. EN 12697-6; Bituminous Mixtures-Test Methods for Hot Mix Asphalt—Part 6: Determination of Bulk Density of Bituminous Specimens. AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación: Madrid, Spain, 2012.
29. Moreno-Navarro, F.; Rubio-Gámez, M. UGR-FACT test for the study of fatigue cracking in bituminous mixes. *Constr. Build. Mater.* 2013, 43, 184–190.
30. Artamendi, I.; Khalid, H.A. A comparison between beam and semi-circular bending fracture tests for asphalt. *Road Mater. Pavement Des.* 2006, 7, 163–180.

31. Cheng, H.; Liu, J.; Sun, L.; Liu, L.; Zhang, Y. Fatigue behaviors of asphalt mixture at different temperatures in four-point bending and indirect tensile fatigue tests. *Constr. Build. Mater.* 2020, 273, 121675.
32. Kalantar, Z.N.; Karim, M.R.; Mahrez, A. A review of using waste and virgin polymer in pavement. *Constr. Build. Mater.* 2012, 33, 55–62.
33. Canet, J.M. *Resistencia de Materiales y Estructuras; Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería: Barcelona, Spain, 2012.*
34. Lu, X.; Isacson, U.; Ekblad, J. Influence of polymer modification on low temperature behaviour of bituminous binders and mixtures. *Mater. Struct.* 2003, 36, 652–656.
35. García-Travé, G.; Tauste, R.; Moreno-Navarro, F.; Sol-Sánchez, M.; Rubio-Gámez, M.C. Use of recycled geomembranes for modification of mechanical performance of bituminous binders. *J. Mater. Civil Eng.* 2016, 28, 04016021.
36. Bala, N.; Kamaruddin, I.; Napiah, M. The influence of polymer on rheological and thermo oxidative aging properties of modified bitumen binders. *J. Teknol.* 2017, 79, 61–73.
37. Das, A.K.; Singh, D. Investigation of rutting, fracture and thermal cracking behavior of asphalt mastic containing basalt and hydrated lime fillers. *Constr. Build. Mater.* 2017, 141, 442–452.

4.3. UNDERSTANDING THE INFLUENCE OF FILLER TYPE AND ASPHALT BINDER CONTENT ON THE MOISTURE AND FATIGUE RESISTANCE OF ASPHALT MORTARS³

4.3.1. Abstract

In order to guarantee the durability of asphalt materials, it is necessary to select materials with a low susceptibility to moisture damage. This paper identifies the influence of the filler typology and bitumen content on the mechanical response of asphalt mortars both before and after the action of water. The study evaluates two typologies of active filler, Portland cement and Calcium carbonate, and a conventional asphalt bitumen (B35/50) for which the content was varied. Stiffness, ductility, and fatigue performance was determined through the implementation of a protocol for asphalt mortar samples using a 3-point bending test performed on a DMA (Dynamic Mechanical Analyzer).

The results indicate that the use of Portland cement presents a higher degree of stiffness, lower ductility, and improved fatigue and water resistance compared to Calcium carbonate. It is also possible to establish an optimal bitumen content based on fatigue results. Content beyond the optimal reduce variations after water action but compromise fatigue resistance. Lower content leads to a poorer performance in both fatigue and moisture resistance. The methodology proposed enables asphalt mortar characterization to be utilized as a tool to optimize the design of asphalt materials.

Keywords: Fine Aggregate matrix, Filler, Bitumen, Asphalt mortar, Fatigue performance, Water performance.

4.3.2. Introduction

The materials used in road construction and the design of asphalt mixtures play a fundamental role in the structural performance, durability, and functionality of the transportation infrastructure. This carries even greater importance nowadays since the demands linked to higher levels of traffic (1) and the effects derived from climate change are increasing (2). This latter phenomenon gives rise to rainfall events of a more extreme nature (3) that lead to the need for new design tools for asphalt materials that provide agile and precise knowledge of their response to the action of water.

Environmental factors, such as thermal gradients, solar radiation, and water derived from precipitations, can incur a profound effect on the durability of asphalt mixtures (4). In mild climatic conditions, the greatest contribution to the deterioration of roads may be that of traffic loading, and the resultant distresses that manifest, such as fatigue cracking, rutting (permanent deformation), and raveling (5, 6). However, when severe climate comes into play, as is becoming

³ El trabajo en este capítulo se basa en la publicación: Tauste, R., Hidalgo, A., García, G., Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gámez, M. (2022). *Understanding the influence of filler type and asphalt binder content on the moisture and fatigue resistance of asphalt mortars*. *Materiales De Construcción*, 72(348), e301. <https://doi.org/10.3989/mc.2022.03522>

more and more common due to the effects of climate change, these distresses escalate as do the effects linked to the action of water, since these constitute key elements in the degradation of asphalt pavements (7). The presence of moisture destroys the chemical bonds between the asphalt binder and the aggregates thereby reducing the adhesion between them significantly (8). Due to this premature failure of adhesion, the cohesion of the asphalt mixture is compromised, and it ceases to act as a coherent structural unit (9). This affects its bearing capacity and induces other pathologies, such as raveling and stripping (10). In addition, when combined with other factors (traffic load, temperature gradients, ice formation, ageing, etc.), it could lead to the medium- or long-term failure of the road layer affected. Hence, control of the moisture susceptibility of asphalt materials is essential for the prolongation of the useful life of the pavement and for the enhancement of its durability.

Many variables affect the amount of moisture damage that occurs in asphalt mixtures. Some are related to mixture design and construction (such as air void content, binder film thickness, permeability, and drainage), environmental factors (temperature, pavement age, freeze-thaw cycles, and presence of ions in the water), traffic conditions, bitumen type, and properties of any additives employed (11). Beyond that, it is clear that the materials that condition the resistance of the asphalt mixture to moisture to a greater degree would be those responsible for bitumen/aggregate adhesion. In this respect, the physical and chemical properties of aggregates (12), of the bituminous binder (13), and of the filler typology (14) employed exert a substantial effect on the performance of asphalt mixtures.

The bituminous binder is not only responsible for the visco-elastic behavior of an asphalt mixture but also for providing its cohesion and stability and its resistance to tensile and shear stresses (15). A proper choice of its dosage constitutes a fundamental factor in preserving the asphalt material from moisture damage without compromising its remaining mechanical properties (such as fatigue resistance, bearing capacity, and permanent deformation performance) (16). This is especially important in course layers, which commonly employ asphalt mixtures with higher binder contents and are more exposed to precipitation events. Furthermore, several studies have shown that the properties of mineral fillers (particles passing through a 0.063 mm sieve) exert a significant effect on the performance of asphalt materials (17, 18). It is common to improve the moisture susceptibility of asphalt mixtures by changing the filler fraction of aggregates, increasing the binder content, or by introducing anti-stripping modifiers (19, 20, 21, 22, 23).

Due to the importance of these elements, the availability of design tools focused on the performance of these materials becomes a key factor in the mitigation of the potential moisture damage occurring during the service life of the pavement (24). In particular, in recent years there has been an increase in the study of Fine Matrix Asphalt (FAM), also known as asphalt mortars. The analysis at this scale is focused on the interaction between asphalt binder, filler, and the finest part of the aggregates (commonly less than 2 mm in diameter) (25), which are, indeed, the main components of asphalt mixtures that condition, among other phenomenon, moisture resistance. Several authors have employed this type of analysis to characterize the water susceptibility and fatigue performance of asphalt materials (26, 27, 28). The study of the mortar scale enables the

influence of bitumen on the adhesiveness of the asphalt materials to be better characterized, not only in relation to the filler (as in the case of mastic), but also to the finest aggregate fraction, thereby testing the maximum specific surface of asphalt mixtures (29, 30).

This study employs a test protocol based on a 3-point bending DMA (Dynamic Mechanical Analyzer) configuration to assess the influence of the type of filler and the bitumen content on the moisture susceptibility and fatigue life of asphalt mortars (FAM).

4.3.3. Materials and Methods

4.3.3.1. Materials

The materials employed in the manufacture of the mortars were B 35/50 penetration bitumen, limestone sand (with a maximum aggregate size of 2 mm and washed to remove filler particles contained thereon), and two different typologies of active filler: Portland cement and Calcium carbonate (Figure 1). The main characteristics of these materials are summarized in Tables 4.3 1 and 4.3 2.

Figure 4.3 1. Materials used for the manufacture of the mortars studied.

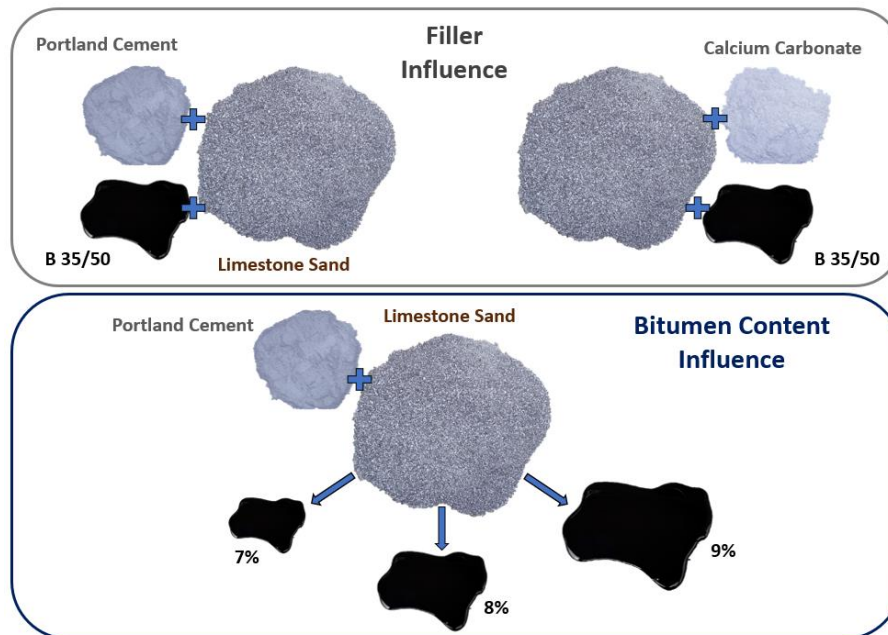


Table 4.3 1 Properties of the limestone sand employed in the study.

Parameter	Sieve (mm)	Percentage of material passing (%)
Granulometry (EN 933-1) (31)	2	100.0
	0.5	18.0
	0.063	0.0
Sand equivalent (EN 933-8) (32)		77.0
Density (kg/m³) (EN 1097-6) (33)		2,770.0
Water absorption (%) (EN 1097-6) (33)		0.9

Table 4.3 2. Properties of the fillers employed in the study.

Parameter	Sieve (mm)	Percentage of material passing (%)	
		Calcium Carbonate	Portland Cement
Granulometry (EN 933-1) (31)	2	100.0	100.0
	0.5	100.0	100.0
	0.125	100.0	100.0
	0.063	94.0	96.0
Density (kg/m³) (EN 1097-3, Annex A) (34)		2,770.0	2,941.0

In order to assess the influence of both the typology of filler and the bitumen content on the moisture resistance of asphalt mortars and their implication with the mechanical performance of this kind of material, four mortars were manufactured. Previously, a bitumen content of reference was established by following the methodology proposed in other studies (27, 30, 35). This consisted of manufacturing the complete mixture intended for reproduction (in this case, a BBTM 11 B mixture (UNE 13108-2) (36) with a bitumen content of 5.3% over the total weight of the mixture), which was then disaggregated after it had cooled down (Figure 4.3 2). The material was then sifted with the aid of metal balls, to separate it into four groups:

- Group 1: Material retained in the 8 mm sieve.
- Group 2: Material that passes through the 8 mm sieve and is retained in the 4 mm sieve.
- Group 3: Material that passes through the 4 mm sieve and is retained in the 2 mm sieve.
- Group 4: Material that passes through the 2 mm sieve.

Figure 4.3 2 Disaggregation of asphalt mixture into groups to define the bitumen content employed in asphalt mortars.



Bitumen extraction was performed by employing an ignition oven to determine the binder content in each group. The binder content to be used in the manufacture of the mortar was set using that obtained in Group 4, and was weighted with the values obtained in Group 3. Subsequent to this process, the binder content of reference to manufacture the mortars was set at 8% on the total weight of the asphalt mortar. This content was employed to establish the differences derived from the use of various kinds of filler.

Once the filler that led to the best performance was determined, two new mortars were manufactured to ascertain the influence of using a bitumen content higher and lower than that of reference. The composition and density of the various asphalt mortars studied herein can be consulted in Table 4.3 3.

Table 4.3 3 Composition and density of the mortars evaluated during this study.

Components	Mortar with CaCO ₃ + 8% bitumen (CC8)	Mortar with Cement + 8% bitumen (CEM8)	Mortar with Cement + 7% bitumen (CEM7)	Mortar with Cement + 9% bitumen (CEM9)
Asphalt binder B35/50 (% over the total weight of the mortar)	8.0	8.0	7.0	9.0
Limestone Sand (% over the total weight of the mortar)	64.4	64.4	65.1	63.7
Filler: Portland Cement (% over the total weight of the mortar)	-	27.6	27.9	27.3
Filler: Calcium carbonate (CaCO ₃) (% over the total weight of the mortar)	27.6	-	-	-
Apparent Density (kg/m ³) (EN 12697-6) (37)	2338.0	2453.0	2419.0	2383.0

The materials that compose the asphalt mortars (aggregates, filler, and bitumen) were heated up to a temperature of 165°C prior to the mixing process. During the mixing, the temperature was also monitored by using a thermal imaging camera. Cylindrical specimens with a size of 150 mm in diameter were then compacted with the aid of a gyratory compactor (EN 12697-31) (38) at a temperature of 155 °C.

In order to minimize the air void influence on the study of the aggregate/binder adhesiveness and its evolution subsequent to water action, the compaction process targets a void content close to 0%

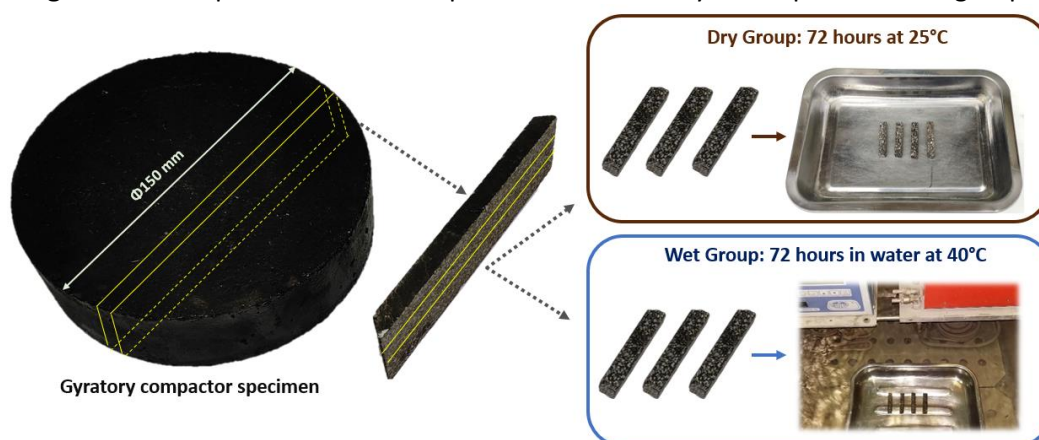
as pointed out in other studies (27, 39). Once compacted, the specimens were cut in order to obtain the prismatic specimens of 8.5 x 8.5 x 50 mm that would subsequently be used in the DMA (Dynamic Mechanical Analyzer) characterization.

4.3.3.2. Testing Plan

The study has the main objective of assessing the influence of the type of filler and bitumen content (key elements in the formulation of both mortars and asphalt mixtures) on the behavior of asphalt mortars in relation to the action of water by analyzing their response to fatigue. To this end, a three-point bending test was employed with the aid of DMA equipment. This test enables bearing capacity, ductility, and fatigue resistance of the material to be characterized (30, 40), thereby providing useful information regarding the influence of the components of the mortars on their mechanical performance and the changes thereof induced by moisture action.

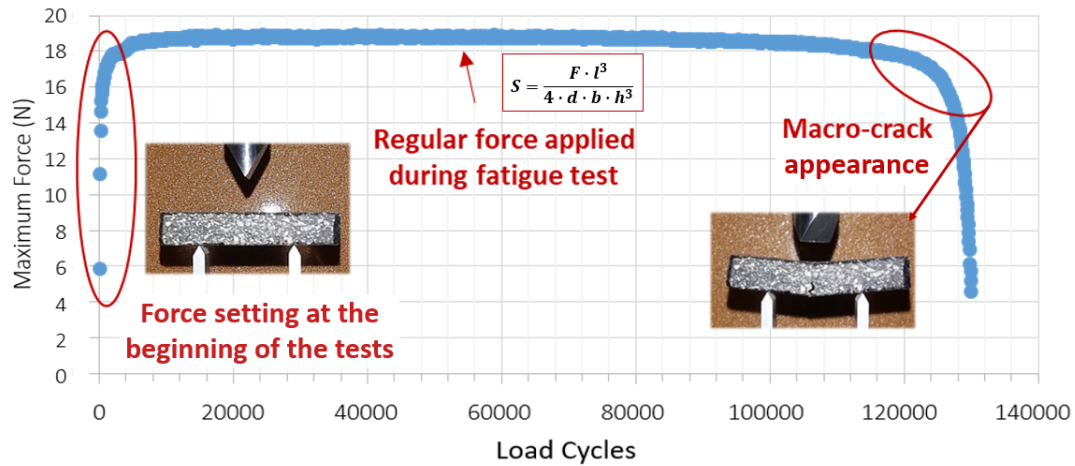
In order to assess the susceptibility to water of bituminous mortars, this test procedure was carried out on two groups of samples of each type of mortar (following a methodology similar to that established in the water sensitivity test of bituminous mixtures (EN 12697-12)). Thus, the specimens manufactured were separated into two groups: a dry group of samples maintained at room temperature (20 ± 5 °C), and a wet group that was conditioned for 72 hours in water at 40 °C after applying a vacuum at a pressure of 6.7 ± 0.3 kPa for 30 ± 5 minutes (Figure 4.3 3).

Figure 4.3 3 Preparation of the samples used in the study and separation into groups.



For each group, nine specimens were considered, three for each level of strain studied (40, 60, and 80 μm , tested in strain-controlled mode). These present levels of load sufficient to reach the range of linear visco-elastic behavior and to maintain it sufficiently for the evaluation of changes in stiffness and ductility before the fatigue failure occurs. Each sample was tested at a temperature of 35 °C (a demanding temperature to induce fatigue response, which enables a suitable characterization and test durations to be attained) and 5 Hz until fatigue failure is reached (Figure 4.3 4).

Figure 4.3 4 Example of the graph of maximum force vs. load cycles obtained for a specimen in the 3-point bending fatigue test.



The effect of moisture on the mortars was evaluated by comparing, for both groups, the various parameters obtained from the test (27):

- Stiffness (S). This parameter enables the bearing capacity of the material to be assessed, and with it, the resistance to permanent deformations. It is a measure of the visco-elastic behavior of the material (as it becomes higher, the mortar becomes more elastic). It is calculated on Young's Modulus obtained from [1] (41) as a relationship between the force applied and the deflection produced in the mortar specimen after 1000 load cycles (Figure 4.3 4),

$$S = \frac{F \cdot l^3}{4 \cdot d \cdot b \cdot h^3} \quad [\text{Equation 1}]$$

where:

F: maximum force applied in the load cycle 1000 (when the specimen is considered undamaged (Figure 4))

l: length between supports

d: deflection displacement measured in the cycle 1000

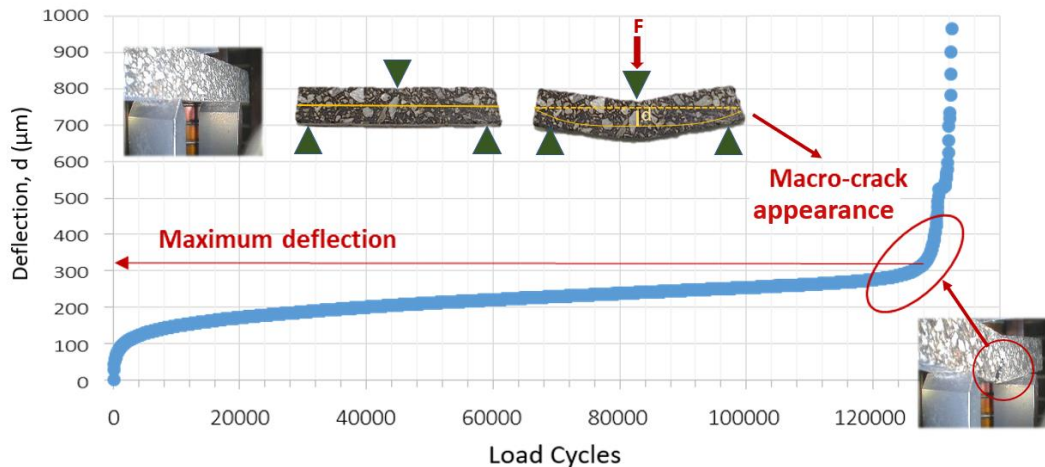
b: width of the specimen

h: height of the specimen

- Maximum deflection (d_{\max}). This parameter makes it possible to evaluate the ductility of the material tested: the more this parameter increases, the higher the ductility. It is measured

as the accumulated deflection in the specimen before the appearance of significant damage in the form of macro-cracks (Figure 4.3 5).

Figure 4.3 5. Deflection (d) evolution and specimen images registered during the 3-point bending fatigue tests on a DMA.



Cycles to failure (N_f). This last parameter is that employed when assessing the fatigue resistance of the mortars tested and, therefore, constitutes a key element in the evaluation of their mechanical performance. It is defined as the total number of load cycles applied in the specimen until the appearance of a macro-crack. This is controlled by making use of a real-time camera installed in the DMA device (Figure 4.3 5) and comparing the images recorded with the maximum force measured by the machine in each load cycle (a sharp drop in the values is indicative of the macro-crack apparition, Figure 4.3 4). Alternatively, if no macro-crack appears after 250,000 load cycles, then this would be the value established as the failure of the specimen.

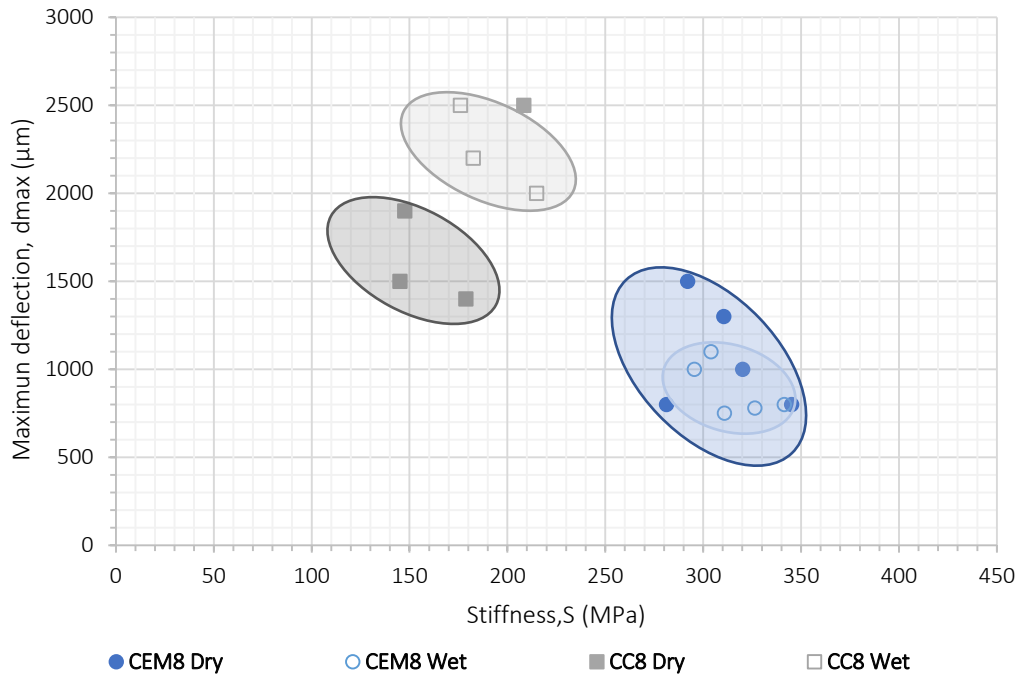
4.3.4. Results and Discussion

The aforementioned parameters were employed to assess the influence of the type of filler and bitumen content on the fatigue performance and moisture resistance of asphalt mortars.

4.3.4.1. Influence of the type of filler

As can be observed in Figure 4.3 6, the use of cement (CEM 8) leads to a greater degree of rigidity and less deflection than does the use of calcium carbonate (CC8), regardless of whether the material has been subjected to water action. This means greater bearing capacity, and therefore higher resistance to permanent deformations.

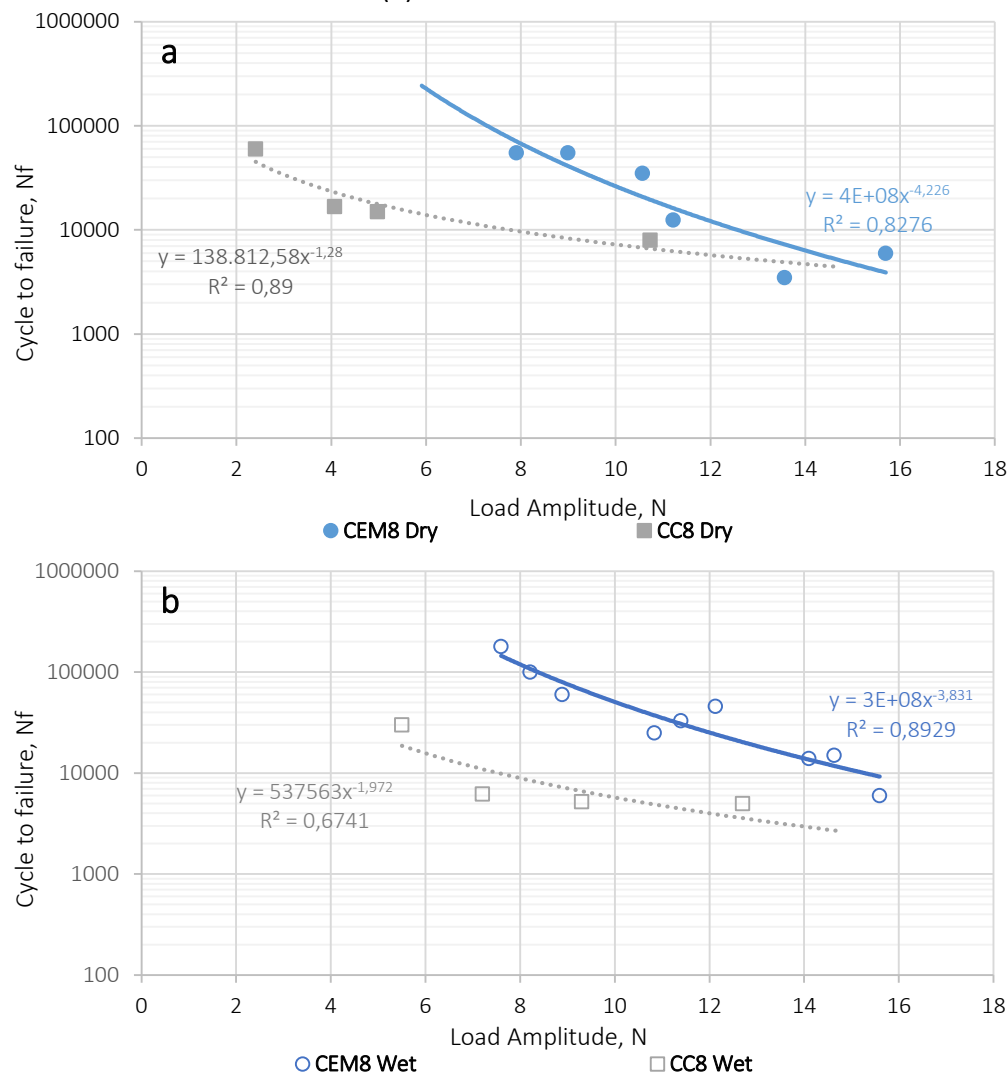
Figure 4.3 6 Influence of the type of filler on stiffness and maximum deflection of asphalt mortars.



In relation to the mortar manufactured with calcium carbonate (CC8), once the material is subjected to the action of the water, its stiffness does not vary significantly. However, it does increase the degree of deflection accumulated before failure, thereby proving this parameter to be more sensitive to moisture effect. As for Portland cement, its use presents smaller differences not only in terms of stiffness (as was the case with carbonate) but also in terms of ductility, thereby indicating a higher resistance to moisture.

Figure 4.3 7a shows the fatigue laws of both mortars before they are subjected to the effect of moisture. In this way, it can be deduced that, in line with that observed above in Figure 4.3 6, the higher rigidity and lower degree of ductility of mortars made with Portland cement (CEM8) also lead to a greater fatigue resistance than its counterpart made of Calcium carbonate (CC8) throughout the entire range of loads. The lower the load applied, the more marked the differences, which indicates a greater durability of mortars that use Portland cement as active a filler (since a higher level of load is required to obtain a similar fatigue life in the two materials, otherwise cement resistance is significantly higher).

Figure 4.3 7 Influence of the type of filler on fatigue resistance of asphalt mortars before (a) and after (b) the action of the water.

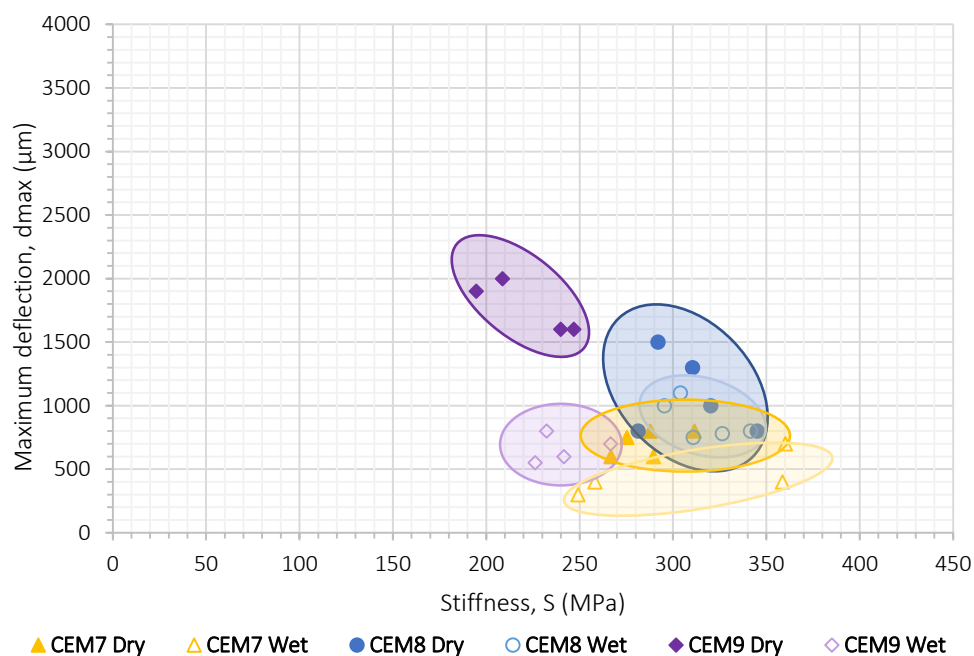


Once mortars have been subjected to the action of water (Figure 4.3 7b), it can be observed how the difference between the fatigue lives of the two materials becomes more marked across the entire range of loads. This confirms the increased moisture resistance of the mortars that use Portland cement as already pointed out by the results of stiffness and ductility (Figure 4.3 6). It can therefore be said that the use of cement as active filler shows better performance than does calcium carbonate in terms of bearing capacity and resistance to both moisture and fatigue. Portland cement was hence chosen as the reference filler for the assessment of the influence of the bitumen content employed.

4.3.4.2. Influence of the binder content

Figure 4.3 8 shows the effect of the binder content on the stiffness and ductility of the asphalt mortars for both dry and wet groups. Regarding stiffness and by focusing on the mortars before water conditioning, it can be observed how the most rigid mortar is the reference mortar (with an intermediate binder content (CEM 8)) with a stiffness that ranges between 300-350 MPa. When the binder content is decreased (CEM 7), the level of stiffness achieved is similar, however, the deflection experienced is lower. This points towards a lower flexibility of the material when the binder content is reduced. On the other hand, when the bitumen content is increased (CEM9), the changes become more marked, with a significant reduction of stiffness (in a range of 200-250 MPa) and an increase of maximum deflection (approximately 1500 μm compared to the lower bitumen contents that stand at approximately 1000-500 μm for 8 and 7%, respectively). In this way, a higher percentage of asphalt binder in the mixture leads to the mortar becoming more ductile.

Figure 4.3 8 Results of stiffness and maximum deflection for mortars with different binder content.

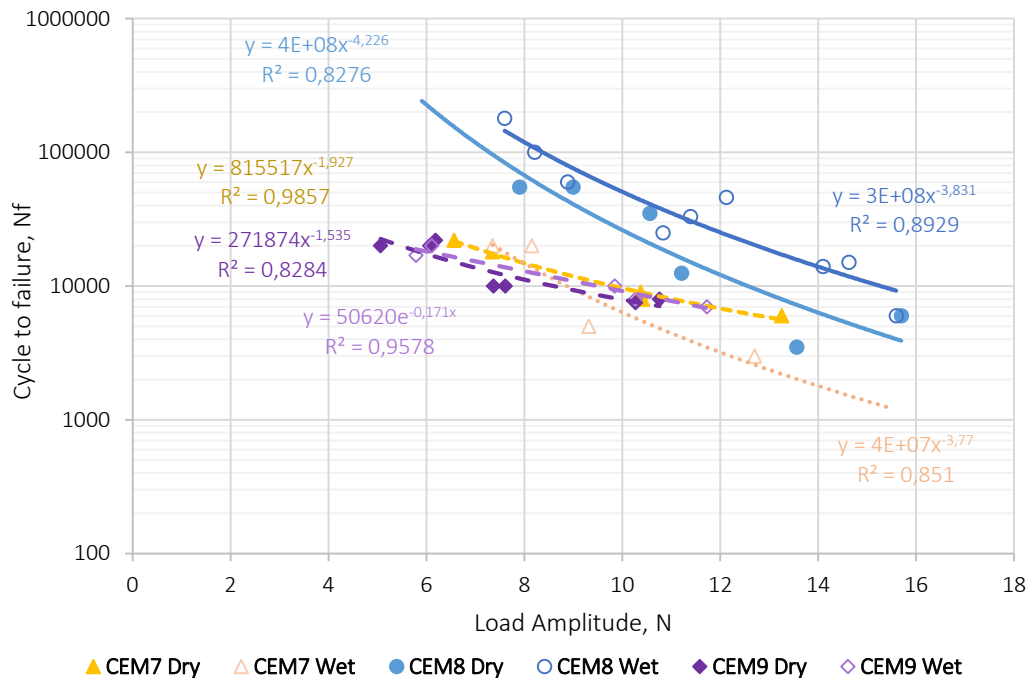


As regarding the effect of water on the mechanical behavior of mortars, it can be observed that, regardless of the bitumen content, similar mechanical behavior is reached. The maximum deflection of the samples of the wet group decreases although the stiffness of the material does not change significantly subsequent to the water action. Despite this general consideration, different degrees of deflection variations can be observed between the different contents of bitumen. Intermediate content (CEM8) shows a lower rate of change that is more marked when this percentage is reduced (CEM 7) and it becomes even more pronounced after increasing the bitumen content (CEM 9). This

points towards a higher degree of sensitivity of this ductility parameter regarding moisture resistance.

Figure 4.3 9 shows fatigue life (Nf) in reference to the load applied in the test. According to the results, it can be observed how this methodology has remarkable potential to establish an optimal bitumen content for the binder tested, which considers both fatigue and moisture resistance since the three percentages analysed present different degrees of fatigue resistance and rate of change subsequent to water conditioning. As can be observed, the mortar manufactured with 8% of bitumen (CEM8) presents the highest degree of durability with levels of fatigue resistance superior to those achieved by the other bitumen contents, regardless of whether they have been subjected to the action of water.

Figure 4.3 9 Fatigue laws of the asphalt mortars manufactured with different bitumen content.



In relation to moisture susceptibility, it can be observed that the reduction of deflection experienced after the water action (Figure 4.3 8) leads to even greater fatigue lives of the wet group. Nonetheless, this phenomenon changes for the other two contents. When the bitumen content is below the optimum (CEM 7), the fatigue life reached decreases despite the lower degree of ductility of the material. This could be related to a poorer bitumen/aggregate adhesion which is confirmed by the results obtained after the water action. According to these results, the fatigue resistance is reduced to a greater extent as the solicitation load level is higher.

When the bitumen content exceeds the considered optimum (CEM9), the differences between the levels of durability achieved before and after water conditioning are the lowest, which would confirm that a rise in the bitumen content is positive to the performance of asphalt materials against water (5). Nevertheless, the fatigue resistance of this material is significantly lower than the mortar manufactured with 8% of bitumen due to the reduction of stiffness and the increase of ductility (Figure 4.3 8) experienced once the optimum content of bitumen is exceeded. This proves the potential of the methodology proposed since, for the materials tested, it enables the effects of moisture on the asphalt mortars to be studied without limiting the assumption of a better performance to the differences found in a specific parameter before and after water conditioning. Instead, the joint consideration of stiffness, ductility, and fatigue evolution enables an optimal bitumen content to be established that considers the permanent deformation, fatigue, and moisture resistance of the material.

4.3.5. Conclusions

This paper studies the influence of the filler typology and binder content on the water and fatigue resistance of asphalt mortars. For this purpose, a methodology based on the 3-point bending fatigue test using the DMA has been applied. On the basis of the results obtained for the materials tested, the following conclusions can be drawn:

- The type of filler employed affects the performance of the mortar. The use of Portland cement leads to a greater degree of rigidity and less ductility. Both parameters change after water action, whereby the variations are less marked after the use of cement instead of Calcium carbonate, which indicates a higher resistance of Portland cement.
- The use of Portland cement leads to higher fatigue resistance than does Calcium carbonate. The differences become greater after the action of water, thereby confirming its better performance against moisture and higher durability of the cement mortar.
- Regarding bitumen content, that below the optimum leads to lower values of deflection but similar levels of stiffness. However, when the content is higher, the variations are more pronounced for both reductions of stiffness and increase of ductility.
- Regardless of the binder content, the action of water leads to changes in the maximum deflection experienced by mortars while the stiffness remains of the same order. Maximum deflection is a more sensitive parameter than is stiffness in the assessment of the changes induced by moisture in asphalt mortars.
- An optimal bitumen dosage can be clearly found based on the fatigue resistance of asphalt mortars by using the methodology proposed.
- Bitumen contents below the optimal present lower variations after the action of water but the fatigue resistance is then compromised. When the content is below the optimal, the

wet group displays a decreasingly lower fatigue life than that of the dry group as the level of load increases.

The methodology proposed enables the effects of moisture on the asphalt mortars to be assessed without limiting the assumption of a better performance to the differences found in a specific parameter before and after water conditioning. Instead, their implications in bearing capacity, ductility, and fatigue are considered. Hence, the mechanical performance of asphalt materials can be established to confront the effects of climate change, as a way to optimize the mixing design. Future work will be carried out on the validation of the potential of the methodology proposed in mortars manufactured with bitumen of different penetration grades, polymer-modified binders, and aggregates of a diverse nature.

4.3.6. References

- 1 Nicodème, C., Diamandouros, K., Diez, J., Durso, C., Arampidou, K., & Nuri, A. K. (2017). Road statistics yearbook 2017. European Union Road Federation
- 2 Barnes, P. W., Williamson, C. E., Lucas, R. M., Robinson, S. A., Madronich, S., Paul, N. D., ... & Zepp, R. G. (2019). Ozone depletion, ultraviolet radiation, climate change and prospects for a sustainable future. *Nature Sustainability*, 2(7), 569-579.
- 3 Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate research*, 47(1-2), 123-138.
- 4 Tauste, R., Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., & Rubio-Gámez, M. C. (2018). Understanding the bitumen ageing phenomenon: A review. *Construction and Building Materials*, 192, 593-609.
- 5 Hunter, R. N., Self, A., Read, J., & Hobson, E. (2015). *The shell bitumen handbook* (p. 789). London, UK: Ice Publishing.
- 6 Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., García-Travé, G., & Rubio-Gámez, M. C. (2018). Fatigue cracking in asphalt mixtures: the effects of ageing and temperature. *Road Materials and Pavement Design*, 19(3), 561-570.
- 7 Thom, N. (2008). *Principles of pavement engineering* (p. 470). London: Thomas Telford.
- 8 Moreno-Navarro, F., García-Travé, G., Rubio-Gámez, M. D. C., & Martínez-Echevarria, M. J. (2014). Analysis of the moisture susceptibility of hot bituminous mixes based on the comparison of two laboratory test methods. *Dyna*, 81(183), 49-59.
- 9 Gorkem, C., & Sengoz, B. (2009). Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2227-2236.

- 10 Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., Tomás-Fortún, E., & Rubio-Gámez, M. C. (2016). High-modulus asphalt mixtures modified with acrylic fibers for their use in pavements under severe climate conditions. *Journal of Cold Regions Engineering*, 30(4), 04016003.
- 11 Behiry, A. E. A. E. M. (2013). Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(3), 351-363.
- 12 Cala, A., Caro, S., Lleras, M., & Rojas-Agramonte, Y. (2019). Impact of the chemical composition of aggregates on the adhesion quality and durability of asphalt-aggregate systems. *Construction and building materials*, 216, 661-672.
- 13 Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., Jimenez del Barco, A., & Rubio-Gámez, M. C. (2017). Analysis of the influence of binder properties on the mechanical response of bituminous mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 18(1), 73-82.
- 14 Chen, Y., Xu, S., Tebaldi, G., & Romeo, E. (2022). Role of mineral filler in asphalt mixture. *Road materials and pavement design*, 23(2), 247-286.
- 15 Moreno-Navarro, F.; Sol-Sánchez, M.; Jiménez del Barco, A.; Rubio-Gámez, M.C. (2015). Analysis of the influence of binder properties on the mechanical response of bituminous mixtures. *International Journal of Pavement Engineering* 18.
- 16 Airey, G. D., Collop, A. C., Zoorob, S. E., & Elliott, R. C. (2008). The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage. *Construction and building materials*, 22(9), 2015-2024.
- 17 Mogawer, W. S., & Stuart, K. D. (1996). Effects of mineral fillers on properties of stone matrix asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 1530(1), 86-94.
- 18 Movilla-Quesada, D., Raposeiras, A. C., Castro-Fresno, D., & Peña-Mansilla, D. (2015). Experimental study on stiffness development of asphalt mixture containing cement and Ca (OH) 2 as contribution filler. *Materials & Design*, 74, 157-163.
- 19 Huang, S. C., Robertson, R. E., Branthaver, J. F., & Claine Petersen, J. (2005). Impact of lime modification of asphalt and freeze-thaw cycling on the asphalt-aggregate interaction and moisture resistance to moisture damage. *Journal of materials in civil engineering*, 17(6), 711-718.
- 20 Arabani, M., & Hamed, G. H. (2014). Using the surface free energy method to evaluate the effects of liquid antistripping additives on moisture sensitivity in hot mix asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, 15(1), 66-78.
- 21 Nasrekani, A. A., Nakhaei, M., Naderi, K., Fini, E., & Aflaki, S. (2017). Improving moisture sensitivity of asphalt concrete using natural bitumen (Gilsonite). In *Proceedings of the Transportation Research Board (TRB 2017), the 96th Annual Meeting, Washington, DC, USA (pp. 8-12)*.

- 22 Mirzababaei, P., Moghadas Nejad, F., & Naderi, K. (2020). Effect of liquid silane-based anti-stripping additives on rheological properties of asphalt binder and hot mix asphalt moisture sensitivity. *Road Materials and Pavement Design*, 21(2), 570-585.
- 23 Arbabbpour Bidgoli, M., Naderi, K., & Moghadas Nejad, F. (2019). Effect of filler type on moisture susceptibility of asphalt mixtures using mechanical and thermodynamic properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(4), 04019024
- 24 Lu, Q. (2005). Investigation of conditions for moisture damage in asphalt concrete and appropriate laboratory test methods. University of California, Berkeley.
- 25 Underwood, B. S., & Kim, Y. R. (2011). Experimental investigation into the multiscale behaviour of asphalt concrete. *International Journal of Pavement Engineering*, 12(4), 357–370. <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.574136>
- 26 Ding, J., Jiang, J., Ni, F., Dong, Q., & Zhao, Z. (2020). Correlation investigation of fatigue indices of fine aggregate matrix (FAM) and asphalt mixture containing reclaimed asphalt pavement materials. *Construction and Building Materials*, 262, 120646. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120646>
- 27 Hidalgo, A. E., Moreno-Navarro, F., Tauste, R., & Rubio-Gámez, M. C. (2020). The influence of reclaimed asphalt Pavement on the mechanical performance of bituminous mixtures. An Analysis at the Mortar Scale. *Sustainability*, 12(20), 8343. <https://doi.org/10.3390/su12208343>
- 28 Nabizadeh, H., Haghshenas, H. F., Kim, Y. R., & Aragão, F. T. S. (2017). Effects of rejuvenators on high-RAP mixtures based on laboratory tests of asphalt concrete (AC) mixtures and fine aggregate matrix (FAM) mixtures. *Construction and Building Materials*, 152, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.101>
- 29 Suresha, S. N., & Ningappa, A. (2018). Recent trends and laboratory performance studies on FAM mixtures: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 174, 496–506. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.144>
- 30 Tauste-Martínez, R., Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., & Rubio-Gámez, M. C. (2021). Multiscale evaluation of the effect of recycled polymers on the long-term performance of bituminous materials. *Road Materials and Pavement Design*, 22(sup1), S99-S116.
- 31 EN 933-1. (2012). Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method. AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.
- 32 EN 933-8. (2012). Tests for geometrical properties of aggregates - Part 8: Assessment of fines - Sand equivalent test. AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.
- 33 EN 1097-6. (2014). Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption. AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.

- 34 EN 1097-3. (1999). Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 3: Determination of loose bulk density and voids. AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.
- 35 Cavalcanti De Sousa, P. (2010). Automated protocol for the analysis of dynamic mechanical analyzer data from fine aggregate asphalt mixes (Doctoral dissertation, Texas A & M University).
- 36 EN 13108-2. (2007). Bituminous mixtures - Material specifications - Part 2: Asphalt Concrete for very thin layers. AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.
- 37 EN 12697-6. (2012). Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens. AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.
- 38 EN 12697-31. (2020). Bituminous mixtures - Test methods - Part 31: Specimen preparation by gyratory compactor. AENOR, Asociación Española De Normalización Y Certificación, Madrid.
- 39 Leiva-Padilla, P., Moreno-Navarro, F., Iglesias-Salto, G., & Rubio-Gamez, M. C. (2020). Recovery capacity of electroconductive asphalt mortars under the influence of magnetic fields. *Materials Today Communications*, 25, 101527.
- 40 Tauste-Martínez, R., Hidalgo, A. E., García-Travé, G., Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gámez, M. D. C. (2022). Influence of Type of Filler and Bitumen on the Mechanical Performance of Asphalt Mortars. *Materials*, 15(9), 3307.
- 41 Canet, J.M. (2012). Resistencia de Materiales y Estructuras. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería: Barcelona, Spain.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

La tesis doctoral se centró en la implementación y puesta en práctica de una nueva metodología de análisis basada en un experimento de ejecución rápida. Esto a partir de un procedimiento para caracterizar la respuesta mecánica de los morteros asfálticos en términos de rigidez, ductilidad, y resistencia a la fatiga utilizando el DMA (*Dynamic Mechanical Analyzer*) y una configuración a flexión de tres puntos. El propósito de este estudio fue analizar la respuesta mecánica de morteros asfálticos realizando variaciones en los componentes del mástico, tales como el tipo de ligante asfáltico, tipo de filler activo o la inclusión de material reciclado (RAP) y las proporciones de estos, con el objetivo final de determinar la influencia de estos componentes del mástico en el comportamiento mecánico de los morteros asfálticos. Las principales conclusiones de esta tesis son las siguientes:

En términos generales la metodología presentada usando el DMA y una configuración de tres puntos a flexión, permitió identificar el efecto o la influencia que tienen los diferentes componentes del mástico analizados y de esta forma determinar el efecto que tienen en el comportamiento mecánico de los morteros de una forma repetible y reproducible.

Fue posible implementar una metodología de ejecución rápida y que requiere el uso de menos material para el estudio y análisis de las propiedades de las mezclas asfálticas, al ser realizado en morteros. Lo que podrá ayudar a simplificar el diseño y caracterización de una manera que requiere menos recursos, tiempo y materiales, es posible encontrar una dosificación óptima de ligante basada en la resistencia a la fatiga de los morteros asfálticos utilizando la metodología propuesta en esta investigación.

La metodología propuesta permitió evaluar los efectos de la humedad sobre los morteros asfálticos. Por lo tanto, el desempeño mecánico de los materiales asfálticos se puede diseñar con el objetivo de contrarrestar los efectos del cambio climático, como una forma de optimizar el diseño de mezcla.

Específicamente, en cuanto a la influencia que tienen los diferentes tipos de filler y el ligante asfáltico en desempeño mecánico de los morteros se puede concluir que:

- La metodología presentada permitió identificar el efecto del filler en la rigidez y ductilidad de los morteros asfálticos, siendo ambos parámetros condicionantes del desempeño mecánico de mezclas asfálticas. Los morteros fabricados con cemento Portland son más rígidos, presentan valores entre 300 y 400 MPa aproximadamente un 30% más que los morteros fabricados con CaCO_3 los cuales presentan valores entre 150-250 MPa.

Los morteros fabricados con cementos también presentaron menor deflexión (d_{\max}) con valores entre los 600 μm y 1400 μm que representan en promedio cerca de un 50% menos en comparación con los morteros fabricados con CaCO_3 los cuales presentaron valores de deflexión entre los 1000 μm hasta 2500 μm .

- Se detectó que el tipo de ligante asfáltico utilizado en la mezcla también afecta la rigidez y la ductilidad. Fue posible distinguir un comportamiento ligeramente más rígido y menos flexible para el ligante modificado con polímero independientemente del tipo de filler activo empleado en la fabricación de los morteros. Los morteros fabricados con el ligante modificado presentaron valores de rigidez mayores en aproximadamente un 13% en el caso de los morteros con cemento Portland y hasta 22% para los morteros fabricados con CaCO_3 .
Para el parámetro de deflexión máxima (d_{max}) en los resultados de la investigación se observó que para morteros fabricados con ligante convencional ya sea con cemento Portland o CaCO_3 , los valores de deflexión disminuyen aproximadamente un 30% y 15%, respectivamente.
- Se observó una mayor resistencia a la fatiga mediante el empleo de ligante asfáltico modificado con polímero independientemente del filler utilizado. Sin embargo, cuando se empleó el mismo tipo de ligante (ya sea convencional o modificado), el mayor grado de rigidez de los morteros fabricados con cemento derivó en una mayor vida a fatiga que en el caso de los morteros fabricados con CaCO_3 .
- Fue posible establecer que la tipología de asfalto o ligante utilizada afectará, la vida útil de fatiga de los materiales asfálticos. Mientras tanto, la rigidez, la ductilidad y las propiedades que dependen de ellos (capacidad portante, resistencia a la deformación permanente, flexibilidad, etc.) estará más condicionado por el tipo de filler empleado.

Al analizar la trabajabilidad, resistencia a la fatiga y sensibilidad al agua de morteros asfálticos fabricados con diferentes cantidades de RAP y adicionando un rejuvenecedor, se puede concluir que:

- A medida que aumenta la cantidad de RAP, se redujó la trabajabilidad de los morteros de mezcla asfáltica hasta en un 48%. Sin embargo, el uso de rejuvenecedores mejora la trabajabilidad hasta en un 15%, facilitando el proceso de la pavimentación y compactación de mezclas diseñadas con altas porporciones de RAP.
- Se detectó que al utilizar en la fabricación de los especímenes un filler activo (por ejemplo, cemento Portland), el uso de altas cantidades de RAP no afecta la sensibilidad al agua de los morteros asfálticos.
- Se identificó que a medida que aumenta el contenido de RAP, los morteros asfálticos presentan una respuesta más elástica y, por lo tanto, son más resistente a las cargas de fatiga.
- A pesar de la presencia de RAP que reduce la ductilidad de los morteros asfálticos para un nivel de deformación dado, la resistencia mecánica a largo plazo (fatiga) no se afectó.

En cuanto a la influencia de la tipología de filler y el contenido de ligante en la resistencia al agua y a la fatiga de los morteros asfálticos, se puede concluir lo siguiente:

- El tipo de filler empleado afectó el rendimiento del mortero. El uso de cemento Portland en la mezcla del mortero asfáltico, conduce a un mayor grado de rigidez y menos ductilidad en comparación con los morteros fabricados con CaCO_3 . En esta investigación se observó un aumento en la rigidez promedio de 30% y una disminución de casi el 50% en las deflexiones (d_{max}) de los morteros fabricados con cemento Portland en comparación con el Carbonato de Calcio.
- Se observó el efecto del agua en los parámetros rigidez y ductilidad, pero las variaciones son menos evidentes con uso de cemento Portland en lugar de Carbonato de Calcio como filler activo lo que indica una mayor resistencia del cemento Portland al efecto del agua. En el caso de los morteros con cemento Portland la ductilidad se redujo cerca de un 12% mientras que la rigidez se mantuvo en el caso del grupo acondicionado, mientras que en el caso de los morteros donde se utilizó Carbonato de Calcio la ductilidad aumentó en aproximadamente un 20% y la rigidez en un 25% con respecto al grupo sometido al efecto del agua.
- Se detectó que el uso de cemento Portland produce una mayor resistencia a la fatiga que el Carbonato de Calcio, la cual varía dependiendo de la carga utilizada en el ensayo. Las diferencias se mayores tras la acción del agua, confirmando así un mejor rendimiento frente a la humedad y una mayor durabilidad del mortero fabricado con cemento.
- Con respecto al contenido de ligante, en comparación con un valor de 8% de óptimo de ligante, cuando se utilizó un porcentaje de ligante por debajo del óptimo (7%), se obtuvieron valores más bajos de deflexión, pero niveles similares de rigidez. Sin embargo, cuando el contenido de ligante es mayor al óptimo (9%), las variaciones detectadas fueron más pronunciadas tanto para la reducción de la rigidez como para el aumento de la ductilidad.
- Independientemente del contenido del ligante asfáltico, la acción del agua condujo a cambios en la deflexión máxima experimentada por los morteros, mientras que la rigidez permaneció en el mismo orden de magnitud. La deflexión máxima fue un parámetro más sensible que la rigidez en la evaluación de los cambios inducidos por la humedad en los morteros asfálticos.
- El contenido de asfalto por debajo del óptimo presenta variaciones más bajas después de la acción del agua, pero la resistencia a la fatiga se ve comprometida. Cuando el contenido está por debajo del óptimo, el grupo húmedo muestra una vida de fatiga cada vez menor que la del grupo seco a medida que aumenta el nivel de carga.

CAPÍTULO 6. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

A partir del desarrollo del trabajo en esta tesis doctoral, se identificaron varias líneas de investigación futuras que podrían ser estudiadas con mayor profundidad.

En primer lugar, sería de interés utilizar los resultados de la presente investigación y compararlos con el comportamiento de mezclas asfálticas diseñadas utilizando los mismos materiales y de esta forma validar los resultados obtenidos y extrapolarlos al diseño de mezclas asfálticas.

Otra área posible de investigación iría dirigida a los tipos de acondicionamiento, se podría probar fabricar morteros asfálticos y aplicar procedimientos de envejecimiento tal y como se hace en mezclas asfálticas.

Por último, considerando los hallazgos de este estudio en su conjunto, sería de interés utilizar esta metodología para probar el uso de diferentes materiales como polímeros o fibras. O la validación del potencial de la metodología propuesta en morteros fabricados con ligantes asfálticos de diferentes grados de penetración, ligantes modificados con polímeros y agregados de diversa naturaleza.

CAPÍTULO 7. REFERENCIAS

En esta sección se enumeran las referencias utilizadas en el **Capítulo 1 Introducción**. Las referencias y bibliografía utilizada en cada uno de los artículos que componen el compendio de publicaciones descritas en el **Capítulo 4. Resultado**, se adjuntan al final de cada una las subsecciones de este apartado.

- Aboelkasim D. & Mahmoud E. (2018). Investigating influence of mineral filler at asphalt mixture and mastic scales. *International Journal of Pavement Research and Technology*, Volume 11(3), 213-224.
- Airey, G. D., Collop, A. C., Zoorob, S. E., & Elliott, R. C. (2008). The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage. *Construction and building materials*, 22(9), 2015-2024.
- Antunes, V.; Freire, A.C.; Neves, J. (2019). A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling. *Construction and building materials*. 211, 453–469.
- Arabani, M., & Hamed, G. H. (2014). Using the surface free energy method to evaluate the effects of liquid antistrip additives on moisture sensitivity in hot mix asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, 15(1), 66-78.
- Arámbula-Mercado, E.; Kaseer, F.; Epps Martin, A.; Yin, F. & Garcia Cucalon, L. (2018). Evaluation of recycling agent dosage selection and incorporation methods for asphalt mixtures with high RAP and RAS contents. *Construction and building materials*. 158, 432–442.
- Arbabbour Bidgoli, M., Naderi, K., & Moghadas Nejad, F. (2019). Effect of filler type on moisture susceptibility of asphalt mixtures using mechanical and thermodynamic properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(4), 04019024
- Artamendi, I. & Khalid, H.A. (2006) A comparison between beam and semi-circular bending fracture tests for asphalt. *Road Materials and Pavement Design*. 7, 163–180.
- Bala, N.; Kamaruddin, I. & Napiah, M. (2017) The influence of polymer on rheological and thermo oxidative aging properties of modified bitumen binders. *Jurnal Teknologi*. 79, 61–73.
- Barnes, P. W., Williamson, C. E., Lucas, R. M., Robinson, S. A., Madronich, S., Paul, N. D., ... & Zepp, R. G. (2019). Ozone depletion, ultraviolet radiation, climate change and prospects for a sustainable future. *Nature Sustainability*, 2(7), 569-579.
- Behiry, A. E. A. E. M. (2013). Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(3), 351-363.

- Behnood, A. (2019). Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review. *Journal Cleaner Production*, 231, 171–182.
- Bituminous Mixtures—Material Specifications—Part 5: Stone Mastic Asphalt. Available online: <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail?pid=00000000030278718> (accessed on 8 October 2020).
- Cala, A., Caro, S., Lleras, M., & Rojas-Agramonte, Y. (2019). Impact of the chemical composition of aggregates on the adhesion quality and durability of asphalt-aggregate systems. *Construction and Building Materials*, 216, 661-672.
- Canet, J.M. (2012). *Resistencia de Materiales y Estructuras*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería: Barcelona, Spain.
- Cavalcanti De Sousa, P. (2010). Automated protocol for the analysis of dynamic mechanical analyzer data from fine aggregate asphalt mixes (Doctoral dissertation, Texas A & M University).
- Chen, Y., Xu, S., Tebaldi, G., & Romeo, E. (2022). Role of mineral filler in asphalt mixture. *Road Materials and Pavement Design*, 23(2), 247-286.
- Corriere, F. & Rizzo, A. (2012) Sustainability in road design: A methodological proposal for the drafting of guideline. *Procedia Social and Behavioral Sciences* 53, 39–48.
- Little, D.N. & Petersen J.C (2005). Unique Effects of Hydrated Lime Filler on the Performance - Related Properties of Asphalt Cements: Physical and Chemical Interactions Revisited. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(2), 207-218.
- Das, A.K.; & Singh, D. (2017). Investigation of rutting, fracture and thermal cracking behavior of asphalt mastic containing basalt and hydrated lime fillers. *Construction and Building Materials*, 141, 442–452.
- De Sousa, P.C. (2010). Automated Protocol for the Analysis of Dynamic Mechanical Analyzer Data from Fine Aggregate Asphalt Mixes. Ph.D. Thesis, Texas A & M University, College Station, TX, USA.
- Ding, J.; Jiang, J.; Ni, F.; Dong, Q. & Zhao, Z. (2020). Correlation investigation of fatigue indices of fine aggregate matrix (FAM) and asphalt mixture containing reclaimed asphalt pavement materials. *Construction and Building Materials*, 262, 120646.
- EN 1097-3.** (1999). Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 3: Determination of loose bulk density and voids. AENOR, *Asociación Española de Normalización y Certificación*, Madrid, Spain.
- EN 1097-6.** (2014). Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption. AENOR, *Asociación Española de Normalización y Certificación*, Madrid, Spain.

- EN 1097-6.** (2014). Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates—Part 6: Determination of Particle Density and Water Absorption. AENOR, *Asociación Española de Normalización y Certificación*, Madrid, Spain.
- EN 12697-31.** (2020). Bituminous mixtures - Test methods - Part 31: Specimen preparation by gyratory compactor. AENOR, *Asociación Española de Normalización y Certificación*, Madrid, Spain.
- EN 12697-6.** (2012). Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens. AENOR, *Asociación Española de Normalización y Certificación*, Madrid, Spain.
- EN 13108-2.** (2007). Bituminous mixtures - Material specifications - Part 2: Asphalt Concrete for very thin layers. AENOR, *Asociación Española de Normalización y Certificación*, Madrid, Spain.
- EN 1426.** (2015). Bitumen and Bituminous Binders-Determination of Needle Penetration. AENOR, *Asociación Española de Normalización y Certificación*, Madrid, Spain.
- EN 1427.** (2015). Bitumen and Bituminous Binders-Determination of the Softening Point—Ring and Ball Method. AENOR, *Asociación Española de Normalización y Certificación*, Madrid, Spain.
- EN 933-1.** (2012). Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method. AENOR, *Asociación Española de Normalización y Certificación*, Madrid, Spain.
- EN 933-8.** (2012). Tests for geometrical properties of aggregates - Part 8: Assessment of fines - Sand equivalent test. AENOR, *Asociación Española de Normalización y Certificación*, Madrid, Spain.
- Farooq, M.A.; Mir, M.S. & Sharma, A. (2018). Laboratory study on use of RAP in WMA pavements using rejuvenator. *Construction and Building Materials*, 168, 61–72.
- García-Travé, G.; Tauste, R.; Moreno-Navarro, F.; Sol-Sánchez, M. & Rubio-Gámez, M.C. (2016). Use of recycled geomembranes for modification of mechanical performance of bituminous binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28, 04016021.
- Gorkem, C., & Sengoz, B. (2009). Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2227-2236.
- Gould, E.; Parkman, C.; Buckland, T. *The Economics of Road Maintenance*. RAC Foundation: London, UK, 2013.
- Hidalgo, A. E., Moreno-Navarro, F., Tauste, R., & Rubio-Gámez, M. C. (2020). The influence of reclaimed asphalt Pavement on the mechanical performance of bituminous mixtures. An Analysis at the Mortar Scale. *Sustainability*, 12(20), 8343. <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/20/8343>

- Hongsheng Q., Ximing T., Shu S. & Heng Z. (2013). Influence of filler–bitumen ratio on performance of modified asphalt mortar by additive. *Journal of Modern Transport*, 21(1):40–46.
- Huang, S. C., Robertson, R. E., Branthaver, J. F., & Claine Petersen, J. (2005). Impact of lime modification of asphalt and freeze–thaw cycling on the asphalt–aggregate interaction and moisture resistance to moisture damage. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(6), 711-718.
- Huang, S.C.; Qin, Q.; Grimes, W.R.; Pauli, A.T.& Glaser, R. (2015). Influence of rejuvenators on the physical properties of RAP binders. *Journal of Test and Evaluation*, 43, 594–603.
- Hunter, R. N., Self, A., Read, J., & Hobson, E. (2015). *The shell bitumen handbook* (p. 789). London, UK: Ice Publishing.
- Hunter, R.N.; Self, A. & Read, J. (2015). *The Shell Bitumen Handbook*, Sixth edition. Shell Bitumen UK.
- Im, S., You, T., Ban, H., & Kim, Y. R. (2017). Multiscale testing-analysis of asphaltic materials considering viscoelastic and viscoplastic deformation. *International Journal of Pavement Engineering*, 18(9), 783-797.
- Kalantar, Z.N.; Karim, M.R. & Mahrez, A. (2012). A review of using waste and virgin polymer in pavement. *Construction and Building Materials*. 33.
- Kim, Y.R. (2003). Mechanistic Fatigue Characterization and Damage Modeling of Asphalt Mixtures. Ph.D. Thesis, Texas A&M University, College Station, TX, USA.
- Kim, Yong-Rak & Little, Dallas & Lytton, Robert. (2003). Fatigue and Healing Characterization of Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 15. 10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:1(75).
- Kumar Das, A. & Singh D. (2017). Investigation of rutting, fracture and thermal cracking behavior of asphalt mastic containing basalt and hydrated lime fillers. *Construction and Building Materials*. 141, 442-452.
- Ding L., Zhang J., Feng B. & Li C. (2020). Performance Evaluation of Recycled Asphalt Mixtures Containing Construction and Demolition Waste Applied as Pavement Base. *Advances in Civil Engineering*. Article ID 8875402, 11. <https://doi.org/10.1155/2020/8875402>
- Leiva-Padilla, P., Moreno-Navarro, F., Iglesias-Salto, G., & Rubio-Gamez, M. C. (2020). Recovery capacity of electroconductive asphalt mortars under the influence of magnetic fields. *Materials Today Communications*, 25, 101527.
- Lo Presti, D & Jiménez, A & Airey, G & Hajj, E. (2016). Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: binder design methodology and case studies. *Journal of Cleaner Production*. 131. 43-51. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.093>.

- Loria, L. G., Sebaaly, P. E., & Hajj, E. Y. (2008). Long-Term Performance of Reflective Cracking Mitigation Techniques in Nevada. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2044), 86-95.
- Lu, Q. (2005). Investigation of conditions for moisture damage in asphalt concrete and appropriate laboratory test methods. University of California, Berkeley.
- Lu, X.; Isacsson, U.; Ekblad, J. (2003). Influence of polymer modification on low temperature behavior of bituminous binders and mixtures. *Materials and Structures*, 36, 652–656.
- M. Guo, Y. Tan, J. Yu, Y. Hou & L. Wang (2017). A direct characterization of interfacial interaction between asphalt binder and mineral fillers by atomic force microscopy. *Materials and Structures*, 50, 141.
- Marek I., Grzegorz M. (2013). Hydrated Lime as the Anti-aging Bitumen Agent. *11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2013. Procedia Engineering*, 57, 424 – 432.
- Masad, E.; Zollinger, C.; Bulut, R.; Little, D.; Lytton, R.; Khalid, H.; Davis, H.; Scarpas, T.; Fini, E. & Guarin, A. Characterization of HMA moisture damage using surface energy and fracture properties. *In Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists- Proceedings of the Technical Sessions*, 75, 713–754.
- Miguel Baptista, A.; Picado-Santos, L.G. & Capitão, S.D. (2013). Design of hot-mix recycled asphalt concrete produced in plant without preheating the reclaimed material. *International Journal of Pavement Engineering*, 14, 95–102.
- Mirzababaei, P., Moghadas Nejad, F., & Naderi, K. (2020). Effect of liquid silane-based anti-stripping additives on rheological properties of asphalt binder and hot mix asphalt moisture sensitivity. *Road Materials and Pavement Design*, 21(2), 570-585.
- Mogawer, W. S., & Stuart, K. D. (1996). Effects of mineral fillers on properties of stone matrix asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 1530(1), 86-94.
- Moreno-Navarro, F., García-Travé, G., Rubio-Gámez, M. D. C., & Martínez-Echevarría, M. J. (2014). Analysis of the moisture susceptibility of hot bituminous mixes based on the comparison of two laboratory test methods. *Dyna*, 81(183), 49-59.
- Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., García-Travé, G., & Rubio-Gámez, M. C. (2018). Fatigue cracking in asphalt mixtures: the effects of ageing and temperature. *Road Materials and Pavement Design*, 19(3), 561-570.
- Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., Jimenez del Barco, A., & Rubio-Gámez, M. C. (2017). Analysis of the influence of binder properties on the mechanical response of bituminous mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 18(1), 73-82.

- Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M. & Rubio-Gámez, M.C (2015a). The effect of polymer modified binders on the long-term performance of bituminous mixtures: The influence of temperature. *Materials and Design*, 78, 5-11.
- Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., Tomás-Fortún, E., & Rubio-Gámez, M. C. (2016). High-modulus asphalt mixtures modified with acrylic fibers for their use in pavements under severe climate conditions. *Journal of Cold Regions Engineering*, 30(4), 04016003.
- Moreno-Navarro, F.& Rubio-Gámez, M. UGR-FACT test for the study of fatigue cracking in bituminous mixes. *Construction and Building Materials*. 2013, 43, 184–190.
- Moreno-Navarro, F.; Sol-Sánchez, M.; Del Barco, A.J. & Rubio-Gámez, M. (2015). Analysis of the influence of binder properties on the mechanical response of bituminous mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 18, 73–82.
- Moreno-Navarro, F.; Sol-Sánchez, M.; Jimenez del Barco, A.; Rubio-Gámez, M.C. (2017). Analysis of the influence of binder properties on the mechanical response of bituminous mixtures. *Int. J. Pavement Eng.* 2017, 18, 73–82.
- Moreno-Navarro, F.; Sol-Sánchez, M.; Jiménez del Barco, A. & Rubio-Gámez, M.C. (2015b). Analysis of the influence of binder properties on the mechanical response of bituminous mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 18 (1).
- Moreno-Navarro, F.; Sol-Sánchez, M.; Jiménez del Barco, A. & Rubio-Gámez, M.C. (2015). Analysis of the influence of binder properties on the mechanical response of bituminous mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 18.
- Moreno-Navarro, F.; Sol-Sánchez, M.; Rubio-Gámez, M.C. (2015). The effect of polymer modified binders on the long-term performance of bituminous mixtures: The influence of temperature. *Materials Design*, 78, 5–11.
- Movilla-Quesada, D., Raposeiras, A. C., Castro-Fresno, D., & Peña-Mansilla, D. (2015). Experimental study on stiffness development of asphalt mixture containing cement and Ca (OH) 2 as contribution filler. *Materials and Design*, 74, 157-163.
- Nabizadeh, H., Haghshenas, H. F., Kim, Y. R., & Aragão, F. T. S. (2017). Effects of rejuvenators on high-RAP mixtures based on laboratory tests of asphalt concrete (AC) mixtures and fine aggregate matrix (FAM) mixtures. *Construction and Building Materials*, 152, 65-73.
- Nasrekani, A. A., Nakhaei, M., Naderi, K., Fini, E., & Aflaki, S. (2017). Improving moisture sensitivity of asphalt concrete using natural bitumen (Gilsonite). *In Proceedings of the Transportation Research Board (TRB 2017), the 96th Annual Meeting, Washington, DC, USA*, 8-12.
- Nicodème, C., Diamandouros, K., Diez, J., Durso, C., Arampidou, K., & Nuri, A. K. (2017). *Road statistics yearbook 2017*. European Union Road Federation
- Pérez-Jiménez, F., Miró, R. & Martínez, A. (2008). Effect of Filler Nature and Content on the Behaviour of Bituminous Mastics. *Road Materials and Pavement Design*, 9, 417-431.

- Pérez-Jiménez, F.; Valdes, G.; Botella, R.; Miró, R. & Martínez, A. (2011). Evaluación del proceso de fatiga de mezclas asfálticas mediante un nuevo procedimiento cíclico de barrido de deformaciones: EBADE. *Revista de Construcción*, 2011, 10, 55–65.
- Picado Santos, L.; Baptista, A.M. & Dias Capitaó, S. (2010). Assessment of the Use of Hot Mix Recycled Asphalt Concrete in Plant. *Journal of Transportation Engineering*, 136, 1159–1164.
- Presti, D.L.; Carrión, A.J.D.B.; Airey, G. & Hajj, E. (2016). Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road surface courses: Binder design methodology and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 131, 43–51.
- Rahman, Afifa & Ali, Syed & Adhikary, Sajal & Hossain, Quazi. (2012). Effect of Fillers on Bituminous Paving Mixes: An Experimental Study. *International of Journal of Engineering Science*. 3. 121-127.
- Rubio, M.C.; Moreno, F.; Belmonte, A. & Menéndez, A. (2010). Reuse of waste material from decorative quartz solid surfacing in the manufacture of hot bituminous mixes. *Construction and Building Materials*, 24, 610–618.
- Ruiz, C. (1960). Concentración Crítica de Filler, su Origen y Significado en la Dosificación de Mezclas Abiertas. Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, Publicación N°11.
- Sadeq, M.; Al-Khalid, H.; Masad, E. & Sirin, O. (2019). Comparative evaluation of fatigue resistance of warm fine aggregate asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 109, 8–16.
- Saleh, M.; Nguyen, N.H. (2019). Effect of rejuvenator and mixing methods on behaviour of warm mix asphalt containing high RAP content. *Construction and Building Materials*, 197, 792–802.
- Sandoval-Navarro, I., Álvarez-Loya, M., Cremades-Ibañez, I. & Alarcón Ibarra, J. (2011). Estudio del efecto del tipo de filler en las propiedades reológicas del mástico. *VII Congreso Mexicano del Asfalto - AMAAC 2011*.
- Silva, H.M.; Oliveira, J.R.; Jesus, C.M. (2012). Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving? *Resources, Conservation and Recycling*, 60, 38–48.
- Sousa, P.C. (2010). Automated Protocol for the Analysis of Dynamic Mechanical Analyzer Data from Fine Aggregate Asphalt Mixes.
- Suresha, S. N., & Ningappa, A. (2018). Recent trends and laboratory performance studies on FAM mixtures: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 174, 496–506.
- Tan Y.; Zhi-Hui L.; Xiao-Yan Z.; & Ze-J. (2010). Research on High- and Low-Temperature Properties of Asphalt-Mineral Filler Mastic. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(8): 811-819.
- Tauste, R., Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., & Rubio-Gámez, M. C. (2018). Understanding the bitumen ageing phenomenon: A review. *Construction and Building Materials*, 192, 593-609.

- Tauste, R.; Moreno-Navarro, F.; Sol-Sánchez, M. & Rubio-Gámez, M.C. (2018). The Effect of the Nature of Rejuvenators on the Rheological Properties of Aged Asphalt Binders. *In RILEM 252-CMB-Symposium on Chemo Mechanical Characterization of Bituminous Materials; Springer: Braunschweig, Germany*, 220–225.
- Tauste, R.; Moreno-Navarro, F.; Sol-Sánchez, M. & Rubio-Gámez, M.C. (2018). Understanding the bitumen ageing phenomenon: A review. *Construction and Building Materials*, 192, 593–609.
- Tauste-Martínez, R., Hidalgo, A. E., García-Travé, G., Moreno-Navarro, F., & Rubio-Gámez, M. D. C. (2022). Influence of Type of Filler and Bitumen on the Mechanical Performance of Asphalt Mortars. *Materials*, 15(9), 3307.
- Tauste-Martínez, R., Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., & Rubio-Gámez, M.D. (2021). Multiscale evaluation of the effect of recycled polymers on the long-term performance of bituminous materials. *Road Materials and Pavement Design*, 22, S99 - S116.
- Thom, N. (2008). Principles of pavement engineering (p. 470). London: Thomas Telford.
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate research*, 47(1-2), 123-138.
- Underwood, B. S., & Kim, Y. R. (2011). Experimental investigation into the multiscale behavior of asphalt concrete. *International Journal of Pavement Engineering*, 12(4), 357–370. <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.574136>
- Underwood, S. B., & Kim, R. Y. (2011). Viscoelastoplastic continuum damage model for asphalt concrete in tension. *Journal of Engineering Mechanics*, 137(11), 732-739.
- Y. Tan & M. Guo (2014). Interfacial thickness and interaction between asphalt and mineral fillers. *Material and Structure*, 47 (4), 605-614.
- Y. Tan & M. Guo. (2014). Micro- and Nano-characteration of interaction between asphalt and filler. *Journal of Testing and Evaluation*., 42 (5), 1089-1097.
- Yongchun C., Jinglin T., Yubo J., Guojin T., Qinglin G., Shurong W. and Ping N. (2016). Influence of the properties of filler on high and medium temperatura performances of asphalt mastic. *Construction and Building Materials*, 118 (2016) 268–275.

CAPÍTULO 8. ANEXOS

En esta sección se adjunta el Anexo 1 y Anexo 2, documentos que describen de forma detallada protocolos que se utilizaron para el desarrollo de esta investigación. El primero describe el protocolo de fabricación de los especímenes prismáticos de mortero asfáltico y el Anexo 2, señala el paso a paso del montaje y protocolo de ensayo usando el DMA.

ANEXO 1. PROTOCOLO DE FABRICACIÓN DE LA MUESTRA

Para empezar con el diseño de los especímenes de mezcla fina (mortero), se presenta a continuación primero el procedimiento de determinación de contenido de asfalto del material y luego el proceso de moldeo, compactación y corte de las probetas.

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Para la preparación de la muestra se parte de los materiales utilizados para la fabricación de una mezcla, donde es común el empleo de arena caliza (tamaño máximo de árido 2 mm) y la fracción filler acorde con la recomendación de la literatura (Lackner et al., 2005; Castelo-Branco, 2008; Underwood, 2011; Soussa et al., 2013). A continuación, se documenta la metodología utilizada:

- Obtener la fracción de Arena 0/2 mm a partir de una muestra de 0/6 mm mediante tamizado y lavado (EN-933-1).

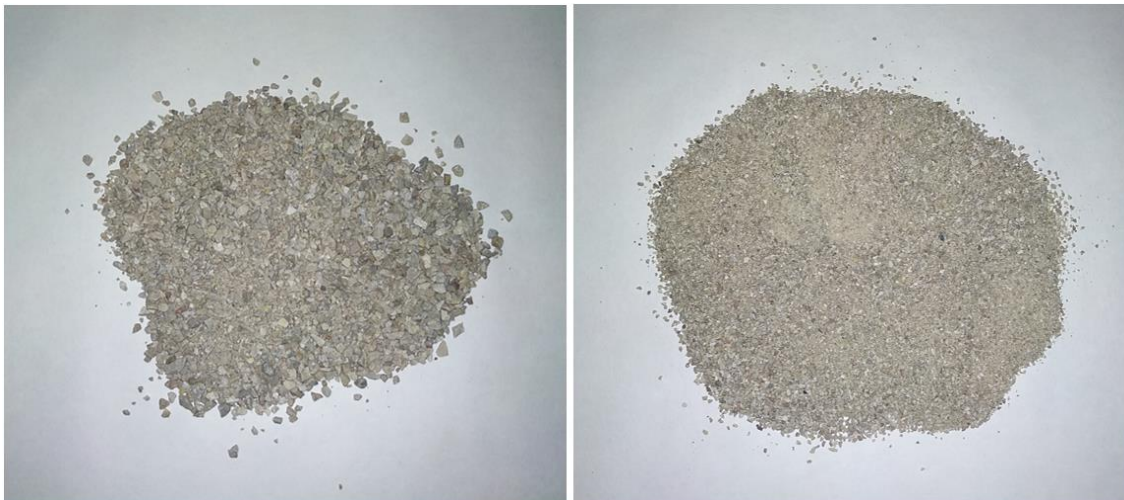


Figura A1 1 Fracción arena caliza 0/6 mm (izquierda) y fracción 0/2 mm lavada y tamizada empleada en el estudio (derecha).

- Fabricar una mezcla completa que luego es disgregada y tras dejar enfriar, se tamiza ayudándose de bolas de metal en una cantidad variable según menor luz de tamiz, para separarla en cuatro grupos.
 - Acondicionar las muestras de mezcla asfáltica en el horno a 135 ± 5 °C durante un periodo de 2 horas.
 - Extraer la muestra del horno y dejar enfriar durante 30 minutos aproximadamente.
 - Separar las partículas de la mezcla de modo manual. En caso de que no sea posible separar la mezcla con la mano, esta puede introducirse nuevamente en el horno hasta alcanzar una temperatura que permita su separación. Posteriormente la mezcla debe

expandirse sobre una superficie lisa y permanecer durante 30 min más para su enfriamiento.

- Separar la mezcla en diferentes tamaños (Nº 4, Nº 8 Y Nº 16). Para facilitar la separación de las partículas durante el tamizado se deben colocar esferas de acero inoxidable de 9.5 mm en cada tamiz. Se recomienda colocar 50 esferas en el tamiz Nº 4, 40 en el tamiz Nº 8 30 esferas y en el tamiz Nº 16 30 esferas también. Las propiedades de las esferas se encuentran descritas en el procedimiento AASHTO T 327. Lo anterior permitirá determinar 4 grupos de tamaños de agregado.

Grupo 1: Material retenido en el tamiz de 8 mm

Grupo 2: Material que pasa el tamiz de 8 mm y queda retenido en el tamiz de 4 mm

Grupo 3: Material que pasa el tamiz de 4 mm y queda retenido en el tamiz de 2 mm

Grupo 4: Material que pasa el tamiz de 2 mm.



Figura A1 2. Separación de la mezcla de referencia en grupos para la determinación del contenido de ligante. De izquierda a derecha: Grupo 1, 2, 3 y 4.

- Determinar el peso de cada grupo de material con una precisión mínima de 0.001 g, ese peso será determinado como $W_{A,i}$, donde i corresponde a cada uno de los tamaños en los que se tamizó la mezcla.
- Determinar el contenido de asfalto de cada grupo mediante el procedimiento de ignición AASHTO T 308 o ASTM D 6307. La ignición del asfalto se considera completa después de 10 minutos de quemado y cuando no ocurren cambios de masa mayores a 0.01%. Posteriormente la muestra se coloca en una bandeja y se deja enfriar al menos 60 minutos y determine su peso $W_{B,i}$, donde i corresponde a cada uno de los tamaños en los que se tamizó la mezcla.
- Calcular el peso del ligante de cada grupo de acuerdo con la siguiente expresión:

$$P_{bi} = \frac{W_{Ai} - W_{Bi}}{W_{Ai}} \times 100\%$$

Tras la extracción del asfalto, en base a los resultados obtenidos en diversas extracciones de esta fracción, se determina el contenido de ligante de los morteros a fabricar.

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD

Con el fin de conocer la densidad objetivo a alcanzar durante la fabricación de cada uno de los morteros (la densidad máxima teórica si se fabricase un mortero sin huecos)

- Caracterizar la densidad de la arena caliza a emplear (EN 1097-6), así como la densidad real de los distintos tipos de filler (EN 1097-7) (Figura A1.3).



Figura A1 3 Determinación de la densidad real de los distintos tipos de filler

La combinación de la densidad del filler junto con la del ligante proporciona el dato de la densidad objetivo de mezcla para cada tipología de mortero que se requiera diseñar. Así, a partir de dichos datos se establece la densidad combinada del conjunto de árido de los distintos morteros y la densidad de mezcla objetivo a alcanzar a través de la compactación de las probetas de mortero.

MOLDEO DE LOS ESPECIMENES

El proceso y tiempo de mezclado utilizado fue el necesario para garantizar una envuelta homogénea y completa de los morteros asfálticos.

- El árido calizo se mezcló entre sí para homogeneizarlo durante 20 segundos. A continuación, se incorpora el ligante y se amasa el mortero durante otros 20 para homogeneizar su dispersión y envuelta sobre la fracción arena. Finalmente, se añade la fracción filler de manera paulatina continuando el proceso de mezclado durante otros 60 segundos tras terminar de incorporar el polvo mineral en su totalidad.
- Para el mezclado se fijó una temperatura de áridos y ligante de 165°C. El control de la temperatura durante todo el proceso de fabricación y la compactación de las muestras se realizó utilizando cámara termográfica.

- La confección de los especímenes comprende la compactación de la mezcla asfáltica fina utilizando el Compactador Giratorio de 150 mm de diámetro y 40 mm de altura a una temperatura de 155°C.

Se establecieron como condiciones de compactación el número suficiente de giros para alcanzar la densidad calculada previamente mediante la combinación de los distintos componentes, obteniendo así un valor mínimo de huecos en la probeta. Para ello se calculó el volumen de la probeta y se ajustó la masa de mezcla fijando una altura objetivo de compactación de 40 mm de altura. El proceso de compactación utilizado aplica presión de consolidación de 600 kPa, un ángulo de giro de 0.82° , y una velocidad de giro superior a 31 rpm.



Figura A1 4. Compactador giratorio empleado en la compactación de los morteros.

EXTRACCIÓN DE LOS ESPECÍMENES

Después de sacar la probeta del compactador giratorio, se determina la densidad y se somete a un proceso de aserrado mediante una sierra de corte de alta precisión para obtener las probetas prismáticas de 8.5 mm x 8.5 mm x 50 mm. En la siguiente figura se puede apreciar el corte transversal de las distintas tipologías de mortero obtenidas.



Figura A1 5. Probeta de mortero tras la fabricación en compactador giratorio y corte en la sierra.

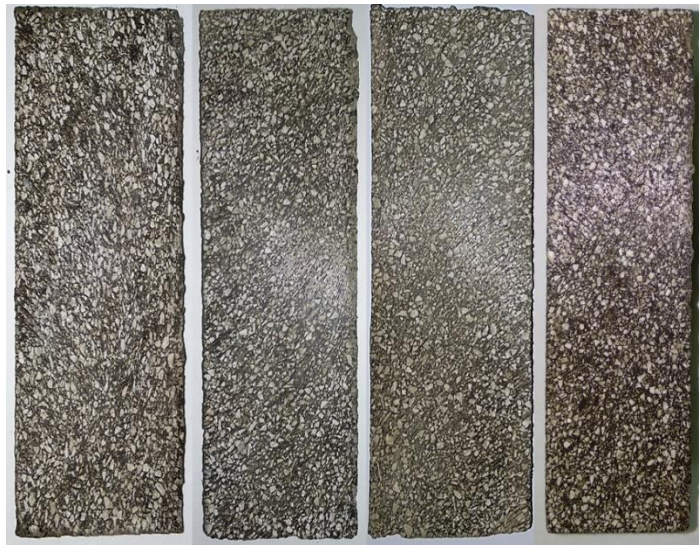


Figura A1 6 Aspecto de los distintos morteros tras corte

ALMACENAMIENTO DE LAS MUESTRAS

Para el almacenamiento de las muestras obtenidas, tanto de la probeta de mortero como de las probetas cilíndricas de 8.5 mm x 8.5 mm x 50 mm, se colocan en la nevera a de 3-5 °C, hasta que vayan a ser utilizadas.

ANEXO 2. PROTOCOLO DE ENSAYO

La siguiente sección define un protocolo para el ensayo de fatiga en tres puntos en mezclas asfálticas. A continuación, se detallan equipos, aditamentos, configuración de ensayo, procesamiento de la información y limitaciones identificadas en el proceso.

EQUIPO

La implementación del ensayo se realizó a partir del Reómetro de Corte Dinámico (DHR). Este tipo de dispositivo aporta información relativa a las propiedades visco-elásticas de los materiales asfálticos de manera similar a los análisis realizados sobre ligantes mediante reómetros dinámicos de corte (DSR). Sin embargo, resulta más versátil que el reómetro ya que permite aplicar otros modos de carga (como la flexión en tres puntos) o analizar distintas configuraciones de muestras (mástico, morteros, etc.). Dicho dispositivo puede además ser utilizado para obtener información acerca de la capacidad de estos materiales de disipar energía a través de la deformación o para caracterizar el daño debido a la fatiga, bajo diferentes condiciones de temperatura y/o humedad (Calvancanti, 2010).

De acuerdo con Figura A2 1 las indicaciones del fabricante, la geometría fatiga en tres puntos permite el análisis de polímeros sólidos y materiales compuestos con altos módulos. El montaje experimental del ensayo se presenta a continuación.

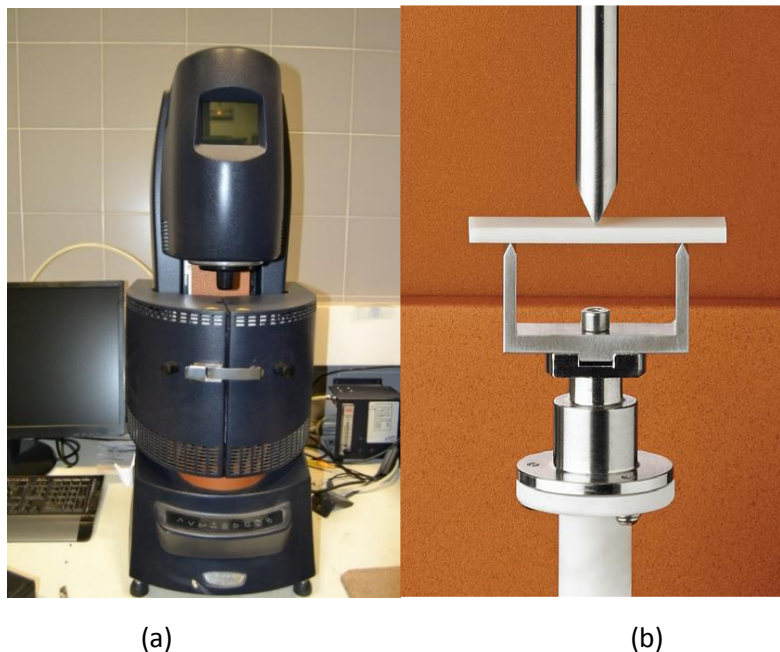


Figura A2 1 Equipo DMA (a) y geometría para falla a fatiga en tres puntos (b)

ADITAMENTOS

Se utilizó el montaje con la geometría para el ensayo a Fatiga en tres puntos (ver Figura A2 2). Para la sujeción de los especímenes se confeccionaron soportes con caras planas que permitieran el ajuste con la geometría disponible, tal y como se aprecia en la figura que se muestra a continuación.



Figura A2 2 Configuración para el montaje del DSR para el ensayo a fatiga en 3 puntos

BARRIDO DE FRECUENCIA-Configuración del ensayo

En primer lugar, se realiza un barrido de amplitudes sobre un conjunto de muestras. Este barrido abarca un rango de deformación entre 1 y 50 micras y se realiza a una frecuencia de 5Hz y a una temperatura de 35° C. Las probetas se acondicionaron a la temperatura de ensayo durante una hora previa al inicio de éste. En base a los resultados obtenidos en dicho barrido de deformaciones, es que se conoce el nivel de deformación para en el cual comienza el daño en la probeta. Además, en las etapas previas se pueden determinar las propiedades visco-elásticas del material (módulo de rigidez y ángulo de fase) dentro del rango visco-elástico lineal (ver Figura A2 3).

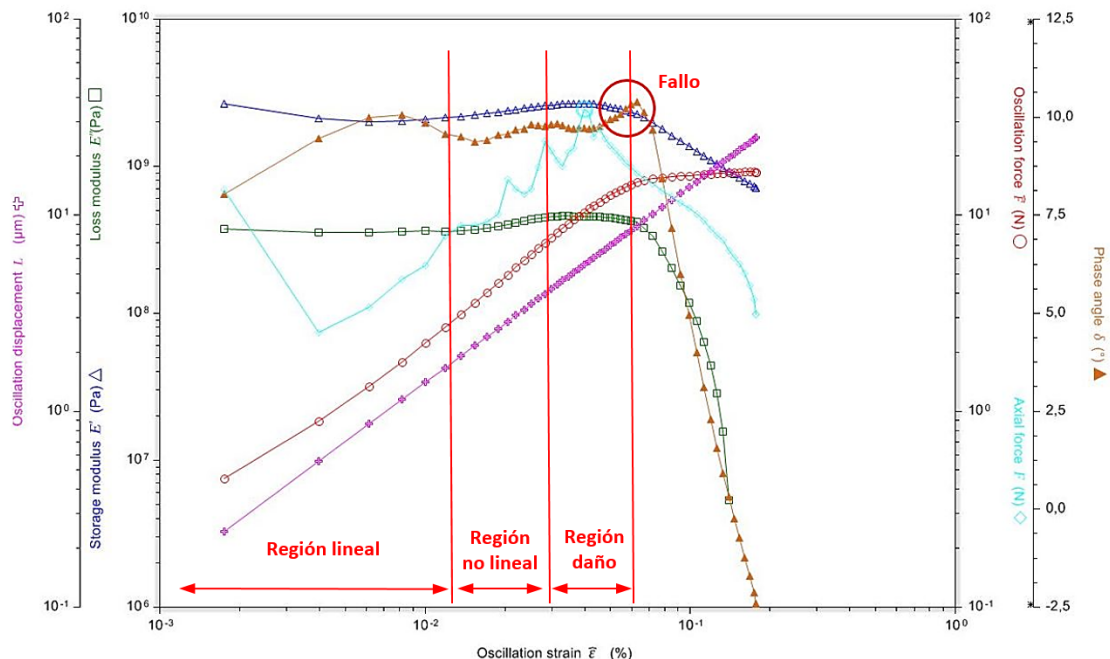


Figura A2 3. Ejemplo de barrido de amplitudes para caracterización del material.

FATIGA-Configuración del ensayo

Una vez caracterizadas las propiedades visco-elásticas de los morteros y tras definir el nivel de deformación a partir del cual comienza el daño en las probetas, se procede a evaluar su resistencia a fatiga ante cargas cíclicas. Para ello las probetas se someten a un nivel de deformación inferior al que provoca el fallo del material e igual en todos los materiales (utilizando la misma precarga). De ese modo, se asegura el contacto entre actuador y probeta durante todo el ensayo, así como un nivel de deflexión homogéneo. Las condiciones de frecuencia (5 Hz) y temperatura (35°C) se mantienen respecto al paso anterior y se procede a analizar la respuesta de las probetas a una carga establecida.

- **Calibración:** Este procedimiento se debe realizar cada vez que se encienda el equipo o se reinicie el programa. Para ello se coloca la pieza metálica en el equipo y se hace calzar la geometría, pulsando el botón con la flecha de bajar, no es necesario que quede en contacto con la pieza.



Figura A2 4 Procedimiento de calibración, ajuste de geometría.

Seleccionar *3 Point venden* donde se debe seleccionar *Calibración* luego se marca la casilla de *Tare gap afer Reading te alignment positio y Read*.

- **Colocación del espécimen:** Luego de este proceso, se saca la pieza y se coloca la probeta, lo más centrada posible y se deja la geometría lo más cerca posible para iniciar el ensayo.



Figura A2 5 Colocación de la probeta prismática de mortero.

- **Acondicionamiento:** Posteriormente se coloca la cámara a una temperatura de 35 °C para acondicionar la probeta durante aproximadamente una hora, antes de iniciar el ensayo. Selecciona la opción de *Enviromental* y en el espacio de *Set point* se ponen 35°C y luego se pincha en *Apply*.

- **Ensayo:** Para esto se seleccione en la pestaña de abajo a la derecha el botón de *File Manager* y luego se selecciona *Experiments*.

Para definir las variables del ensayo se selecciona *Procedure: fatiga 3 points*. Acá primero se pincha en *1: Conditioning Options Active* y se coloca las condiciones de carga del ensayo. Posteriormente en la ventana de *2. Oscilation Time* se puede variar la duración del ensayo *Duration* o el desplazamiento axial *displacement*.

Una vez definidos estos parámetros se inicia con el ensayo pulsando *Start*.