



Efecto del envejecimiento y de la acción del agua en la fisuración de las mezclas asfálticas

Teresa López Montero

ADVERTIMENT La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del repositori institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) i el repositori cooperatiu TDX (<http://www.tdx.cat/>) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual **únicament per a usos privats** emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei UPCommons o TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a UPCommons (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del repositorio institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) y el repositorio cooperativo TDR (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=es>) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual **únicamente para usos privados enmarcados** en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio UPCommons. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a UPCommons (*framing*). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the institutional repository UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) and the cooperative repository TDX (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=en>) has been authorized by the titular of the intellectual property rights **only for private uses** placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor availability from a site foreign to the UPCommons service. Introducing its content in a window or frame foreign to the UPCommons service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Efecto del envejecimiento y de la acción del agua en la fisuración de las mezclas asfálticas

TESIS DOCTORAL

Teresa López Montero

Director:

José Rodrigo Miró Recasens

Tesis presentada para obtener el

**TÍTULO DE DOCTORA POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA
CON MENCIÓN DE DOCTORADO INTERNACIONAL**

Programa de Doctorado en Ingeniería e Infraestructuras del Transporte
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona

Barcelona, junio de 2018

Este trabajo de investigación ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad por medio del Proyecto PROFIS (BIA2012-36508), desarrollado en el marco del VI Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica, cofinanciado con fondos del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) de la Unión Europea. Así, quisiera agradecer la concesión de la ayuda para la Formación de Personal Investigador (FPI) asociada a este proyecto (BES-2013-065678), así como las ayudas para la realización de estancias breves en otros centros de investigación (EEBB-I-15-09527 y EEBB-I-17-122209).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a todas aquellas personas que de una o de otra forma han contribuido en su desarrollo. Así, en primer lugar, me gustaría empezar mostrando mi gratitud a todos aquellos que no nombre explícitamente en estos agradecimientos.

A mi director de tesis, Rodrigo Miró, quisiera agradecerle su confianza y la oportunidad que me ofreció para realizar esta tesis doctoral, la cual no habría sido posible sin sus consejos y su dedicación en el tutelaje de la misma. Igualmente quisiera darle las gracias por compartir sus conocimientos conmigo, por su cercanía y su disponibilidad para guiarme en el desarrollo de este trabajo.

A los profesores del grupo de caminos, Félix E. Pérez, Adriana Martínez y Ramón Botella, por todo su tiempo y su disponibilidad para ayudarme desinteresadamente a resolver las dudas que me han ido surgiendo.

A José Amoros y Jordi Martín por su apoyo y su ayuda en la realización de los trabajos de laboratorio, sin los cuales no habría sido posible llevar a cabo toda la parte experimental de este trabajo.

A la Universidad de Nottingham, y, en especial, al profesor Gordon Airey por su tutelaje durante mi estancia, así como a los compañeros del NTEC, por su acogida.

A la Universidad de Lisboa, en especial, al profesor Luis Picado por darme la oportunidad de realizar una estancia dentro de su grupo de investigación, a João Crucho por todo su tiempo y su predisposición para sacar adelante el trabajo programado durante la estancia, y, por último, a Rui García por su ayuda en la realización de los trabajos de laboratorio.

A mi familia, en especial a mis padres, Melchor y Teresa, sin los cuales nada de esto hubiese sido posible. Su apoyo a lo largo de estos años ha significado mucho para mí. También por todo su esfuerzo por darme siempre lo mejor y ayudarme a alcanzar todas las metas que me he propuesto.

Por último, pero no menos importante, quería dar un especial agradecimiento a Mario, por su comprensión y por haber estado a mi lado durante todo el proceso. Gracias por tus gestos de atención, los favores que me has hecho y, por supuesto, cada palabra de apoyo, los cuales me han brindado la fortaleza que necesitaba para seguir adelante.

Resumen

La fisuración de las mezclas bituminosas es uno de los mecanismos de deterioro más frecuentes en los pavimentos flexibles. Este fenómeno se produce tanto por la aplicación de cargas, como por la degradación del material consecuencia de su exposición a las condiciones ambientales.

Los principales factores que afectan a la durabilidad de las mezclas son el envejecimiento y la acción del agua. Es por este motivo que analizar la resistencia a la fisuración de mezclas envejecidas y/o sometidas a daño por humedad se convierte en un factor clave en la prevención contra el deterioro y el fallo de los pavimentos.

El objetivo de esta tesis es precisamente estudiar el efecto del envejecimiento, de la acción del agua y de la temperatura en la fisuración de las mezclas. Para ello, se han utilizado dos tipos de ensayo: un ensayo de tracción directa (Fénix) y un ensayo cíclico de barrido de deformaciones (EBADE), aplicados sobre mezclas no acondicionadas, envejecidas, sometidas a daño por humedad y envejecidas y sometidas a la acción del agua.

Los resultados obtenidos han mostrado la gran influencia del envejecimiento y de la temperatura de ensayo en el comportamiento a fisuración de las mezclas, especialmente cuando se combinan entre ellos, mientras que, para las condiciones estudiadas, el efecto de la acción del agua ha tenido menos influencia. Esto pone de manifiesto la aplicabilidad de los ensayos Fénix y EBADE en el estudio y diseño de los materiales que forman los pavimentos asfálticos.

A partir de los resultados del ensayo EBADE, se ha propuesto una nueva metodología para estimar las leyes de fatiga de las mezclas, lo cual permite estudiar el efecto de diferentes variables (envejecimiento, temperatura de ensayo o tipo y dotación de ligante) sobre la vida a fatiga de las mezclas asfálticas, que de otra forma (a partir de los ensayos clásicos de barrido de tiempo) requeriría demasiado tiempo.

Por último, la introducción de periodos de reposo en los ensayos cíclicos para el estudio de la fisuración por fatiga de las mezclas ha mostrado la importancia que tiene la secuencia de la aplicación de solicitaciones en su vida a fatiga, así como el comportamiento diferenciado de la mezcla en función de su rigidez.

Palabras clave: fisuración, envejecimiento, daño por humedad, fatiga, fractura, ensayo Fénix, ensayo EBADE, leyes de fatiga, periodos de reposo.

Abstract

Asphalt mixtures cracking is one of the most common deterioration mechanisms in flexible pavements. This phenomenon is due to both the application of loads and the degradation of the material as a result of its exposure to environmental conditions.

The main factors affecting the mixtures durability are ageing and the action of water. This is the reason why analyzing the cracking resistance of mixtures subjected to moisture damage, aged and subjected to moisture damage after ageing becomes a key factor in the prevention of pavement damage and failure.

The objective of this thesis was precisely to study the effect of ageing, the action of water and temperature in the mixtures cracking. To this end, two different tests were used: a direct tensile test (Fénix) and a strain sweep cyclic test (EBADE). Both were applied on unconditioned mixtures, aged mixtures, mixtures subjected to moisture damage and aged mixtures subjected to moisture damage.

Results show the great influence of ageing and test temperature on the cracking behavior of mixtures, especially when they combine with one another, while the effect of the action of water has less influence for the studied conditions. Thus, the applicability of Fénix and EBADE tests in the study and design of asphalt pavement materials is highlighted.

A new methodology was proposed to estimate the fatigue laws of mixtures based on the EBADE test results. This allows the effect of different variables (ageing, test temperature or binder type and content) to be studied on the asphalt mixtures fatigue life. Otherwise (from the classic time sweep tests), it would require too much time.

Finally, the introduction of rest periods in cyclic tests for the study of fatigue cracking of mixtures shows the importance of the sequence of applied loads in mixtures fatigue life, as well as the different behavior of mixtures depending on their stiffness.

Key words: cracking, ageing, moisture damage, fatigue, fracture, Fénix test, EBADE test, fatigue laws, rest periods.

Índice general

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
ÍNDICE GENERAL	V
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XIX
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS	1
2. OBJETIVOS	4
3. CONTENIDO	5
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	7
1. EL FENÓMENO DEL ENVEJECIMIENTO	8
1.1. Mecanismos asociados con el envejecimiento de las mezclas asfálticas	9
1.2. Variables que intervienen en proceso de envejecimiento	11
1.3. Parámetros de evaluación y efectos del envejecimiento	13
1.4. Procedimientos de envejecimiento	15
2. EL DAÑO POR HUMEDAD EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	16
2.1. Adhesividad	19
2.3. Mecanismos de daño por humedad	21
2.4. Factores que influyen en el daño por humedad	26
2.5. Manifestaciones de deterioro causado por el agua	31
2.6. Métodos de acondicionamiento y de ensayo de sensibilidad al agua en mezclas asfálticas	32
3. LA FISURACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	36
3.1. Comportamiento a fractura de las mezclas asfálticas	39
3.1.1. Ensayos monotónicos para la determinación del fallo por fisuración	42
3.2. Comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas	42
3.2.1. Leyes de fatiga	46
3.2.2. Parámetros de influencia en el comportamiento a fatiga	48
3.2.3. Ensayos para la determinación del fallo por fatiga	51
3.2.4. Criterios de fallo	52
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	55
1. MATERIALES	56
2. PROCEDIMIENTOS DE ACONDICIONAMIENTO DE LA MEZCLA	59
2.1. Procedimiento de envejecimiento	59

2.2. Procedimiento de daño por humedad.....	61
3. ENSAYOS	62
3.1. Fénix.....	62
3.2. Ensayo EBADE (barrido de deformaciones).....	64
3.3. Ensayos de Barrido de tiempo.....	68
3.3.1. Ensayo de tracción-compresión.....	69
3.3.2. Ensayo de flexión en dos puntos	69
3.4. Ensayo de Tracción Indirecta.....	71
4. PLANIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS	71
CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....	79
1. EFECTO DEL ENVEJECIMIENTO Y DE LA ACCIÓN DEL AGUA EN LA FISURACIÓN DE LA MEZCLA	80
1.1. Fractura.....	80
1.1.1. Efecto del envejecimiento en la resistencia a la fisuración.....	80
1.1.1.1. Efecto del tipo de ligante y de la temperatura en el envejecimiento	85
1.1.2. Efecto del daño por humedad en la resistencia a la fisuración	88
1.1.3. Efecto combinado de envejecimiento y daño por humedad en la resistencia a la fisuración	96
1.1.4. Efecto del envejecimiento y del daño por humedad en la resistencia a la fisuración mediante el ensayo de tracción indirecta.....	100
1.2. Fatiga.....	108
1.2.1. Efecto del envejecimiento en la resistencia a la fisuración por fatiga	108
1.2.1.1. Efecto del tipo de ligante y de la temperatura en el envejecimiento	111
1.2.1.2. Efecto del tipo de árido en el envejecimiento	112
1.2.2. Efecto del daño por humedad en la resistencia a la fisuración por fatiga	114
1.2.3. Efecto combinado de envejecimiento y daño por humedad en la resistencia a la fisuración por fatiga	118
2. LEYES DE FATIGA.....	120
2.1. Barrido de deformaciones	121
2.2. Barrido de tiempo.....	123
2.3. Comparación entre barrido de tiempo y barrido de deformaciones.....	132
2.4. Estimación de las leyes de fatiga a partir del ensayo EBADE	135
2.4.1. Aplicación de las leyes de fatiga en el cálculo analítico de firmes.....	144
2.5. Ensayo a flexotracción de dos puntos.....	152
3. EFECTO DE LOS PERIODOS DE REPOSO EN LA FATIGA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	159
3.1. Ensayos de Barrido de Deformaciones.....	160
3.2. Ensayos de Barrido de Tiempo.....	164
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES (CONCLUSIONS)	175
1. CONCLUSIONES.....	175
1.1. Efecto del envejecimiento y de la acción del agua en la fisuración de la mezcla.....	175

1.2. <i>Leyes de fatiga</i>	178
1.3. <i>Efecto de los periodos de reposo en la fatiga de las mezclas asfálticas</i>	180
2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	181
CONCLUSIONS.....	183
1. CONCLUSIONS.....	183
1.1. <i>Effect of ageing and the action of water on the mixture cracking</i>	183
1.2. <i>Fatigue laws</i>	185
1.3. <i>Effect of rest periods on the fatigue of asphalt mixtures</i>	187
2. FUTURE RESEARCH LINES	188
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	191
ANEXOS	211
ANEXO 1. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA Y ACTIVIDADES.....	211

Índice de figuras

Figura 2.1. Representación esquemática del efecto del envejecimiento en la vida útil de los pavimentos asfálticos [7].	8
Figura 2.2. Evolución del número de ciclos de fallo con σ/E [19].	9
Figura 2.3. Etapas del proceso de envejecimiento [29].	11
Figura 2.4. Muestras de mezcla bituminosa en caliente antes del envejecimiento (izquierda) y después de 2000 horas de exposición a envejecimiento (derecha) [52].	13
Figura 2.5. Separación en fracciones SARA para algunos betunes [55].	13
Figura 2.6. Ranking de la vida a fatiga de las muestras antes y después de ser sometidas a envejecimiento a largo plazo [23].	15
Figura 2.7. Funcionamiento del mecanismo de adhesividad [106].	19
Figura 2.8. Características de la superficie de la interfaz árido-mástico: (a) superficie del árido rugosa (b) buen mojado por el mástico y (c) mal mojado por el mástico [107].	19
Figura 2.9. Ángulos de contacto entre árido-ligante. a) Líquido con baja mojabilidad y b) líquido con alta mojabilidad (modificado a partir de Moraes, <i>et al.</i> [110]).	20
Figura 2.10. Superficie mineral de un material ionizado por la presencia de humedad: a) material calcáreo y b) material silíceo.	21
Figura 2.11. a) Fallo adhesivo, b) fallo cohesivo y c) fallo mixto [115].	21
Figura 2.12. Modos de penetración del agua en las mezclas asfálticas: a) permeabilidad, b) ascensión capilar y c) difusión [107].	22
Figura 2.13. Separación del daño por humedad en procesos físicos y mecánicos [107].	23
Figura 2.14. Esquema de la pérdida de contenido de mástico debido a la presencia de un flujo de agua.	24
Figura 2.15. Esquema de la pérdida de contenido de mástico debido a la presencia de un flujo de agua.	25
Figura 2.16. Incremento de la pérdida de mástico debido al debilitamiento del ligante, causado por difusión molecular [107].	25
Figura 2.17. Lavado hidráulico o <i>pumping action</i> en el firme asfáltico: a) carga debida al tráfico, b) exceso de presión en los poros y c) flujo rápido de agua [140].	26
Figura 2.18. Resumen de las propiedades físicas de los áridos y cómo afectan al daño por humedad [125].	28
Figura 2.19. Influencia del agua en la magnitud de la penetración para las mezclas CA 80-100 y CA 60-70 [157].	28
Figura 2.20. Esquema idealizado del proceso de contracción del betún y separación del árido [157].	29
Figura 2.21. Ilustración esquemática de los huecos de aire en tres mezclas distintas [162].	30
Figura 2.22. Clasificación del contenido de huecos de aire en las mezclas asfálticas [162].	30
Figura 2.23. Desprendimiento de los áridos por efecto de la acción del agua [179].	32
Figura 2.24. Modos de propagación de una fisura [223].	37
Figura 2.25. a) Fisura longitudinal y b) fisura transversal [225].	37
Figura 2.26. a) Diferentes aspectos de las fisuras y b) diferentes patrones de las fisuras [216].	38

Figura 2.27. Ciclo de histéresis del diagrama tensión-deformación [243].	39
Figura 2.28. Curvas tensión-desplazamiento para materiales: (a) con un comportamiento lineal y (b) con un comportamiento no lineal [248].	40
Figura 2.29. Geometría del modo I de fractura [250].	41
Figura 2.30. Forma esquemática de obtención de la energía de fractura [247].	42
Figura 2.31. Curva de Whöler [269].	44
Figura 2.32. Evolución de la deformación unitaria con el número de ciclos de carga [271].	45
Figura 2.33. Influencia del módulo y de la deformación crítica en el fallo por fatiga [270].	45
Figura 2.34. Etapas o fases del proceso de degradación de una mezcla asfáltica [273].	46
Figura 2.35. Distintas leyes de fatiga según su módulo y deformación crítica [270].	47
Figura 2.36. Curva clásica de fatiga donde se observa el límite de resistencia a fatiga.	47
Figura 2.37. Efecto del porcentaje de huecos en la vida a fatiga de la mezcla [279].	48
Figura 2.38. Efecto del contenido de ligante [284].	49
Figura 2.39. Leyes de fatiga para distintas granulometrías [290].	50
Figura 2.40. Diferentes patrones de carga.	50
Figura 2.41. Influencia de la temperatura en la vida a fatiga.	51
Figura 2.42. Evolución de la tensión y la deformación según el modo de carga aplicado.	51
Figura 2.43. Criterios de fallo: a) Criterio convencional, b) Criterio de daño, c) Criterio de energía disipada, d) Criterio de ratio de energía disipada y e) Criterio de la deformación de rotura.	54
Figura 3.1. Granulometría de la mezcla AC16S.	56
Figura 3.2. Granulometría de la mezcla BBTM 11A.	58
Figura 3.3. Granulometría de la mezcla AC14.	58
Figura 3.4. Bandejas con la mezcla suelta envejeciéndose en el horno.	59
Figura 3.5. De izquierda a derecha, placa de mezcla bituminosa, probetas obtenidas a partir de dicha placa y probeta trapezoidal.	60
Figura 3.6. Probetas de mezcla bituminosa en el equipo de envejecimiento TEAGE.	61
Figura 3.7. (a) Ensayo Fénix y fisura de la probeta después del ensayo, y (b) curva carga-desplazamiento [306].	62
Figura 3.8. (a) Dimensiones de la probeta y (b) Probeta durante el ensayo EBADE [307].	65
Figura 3.9. Esquema representativo del ensayo EBADE [308].	65
Figura 3.10. Elipse formada en la gráfica deformación-tensión.	66
Figura 3.11. Evolución de la densidad de energía disipada con el número de ciclos en el ensayo EBADE a 20°C y 10 Hz.	67
Figura 3.12. Esquema representativo de los ensayos de barrido de tiempo.	68
Figura 3.13. Probetas trapezoidales durante el ensayo de flexión en dos puntos.	70
Figura 3.14. Diagrama de flujo del plan experimental.	72
Figura 3.15. Diagrama de flujo del plan experimental seguido durante la estancia en la Universidad de Nottingham.	75
Figura 3.16. Diagrama de flujo del plan experimental seguido en el estudio de la tixotropía.	75
Figura 3.17. Esquema representativo del ensayo EBADE donde al finalizar cada escalón de carga la	

deformación vuelve a ser la correspondiente al primer escalón.	76
Figura 3.18. Esquema representativo del ensayo de barrido de tiempo introduciendo periodos de reposo de 10 min cada 200 ciclos de carga.	77
Figura 3.19. Diagrama de flujo del plan experimental seguido durante la estancia en la Universidad de Lisboa.	78
Figura 4.1. Curvas carga-desplazamiento de una probeta representativa de la mezcla no acondicionada (No acond) y de la mezcla envejecida durante el ensayo Fénix a 20°C. Mezcla fabricada con betún 50/70.	81
Figura 4.2. Resultados promedio de los principales parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix para las condiciones no acondicionadas (No acond) y envejecidas (Env): a) carga máxima (F_{max}), b) índice de rigidez a la tracción (IRT), c) energía de rotura (G_F), d) índice de tenacidad (IT) y e) desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico ($d_{0,5PM}$).	83
Figura 4.3. Representación esquemática de las curvas carga-desplazamiento en mezclas no acondicionadas y mezclas envejecidas.	85
Figura 4.4. Valores de desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico ($d_{0,5PM}$) frente al índice de rigidez a la tracción (IRT) en el ensayo Fénix a 20, 5 y -5°C, para la mezcla no acondicionada (No acond) y envejecida (Env), fabricada con los betunes 50/70 y PMB 45/80-65.	85
Figura 4.5. Valores de índice de envejecimiento para los distintos parámetros del ensayo Fénix. a) 20°C, b) 5°C y c) -5°C. Mezcla fabricada con los betunes 50/70 y PMB 45/80-65.	87
Figura 4.6. Curvas carga-desplazamiento de una probeta representativa fabricada con betún 50/70, no acondicionada (No acond) y sometida a daño por humedad (Húmeda), durante el ensayo Fénix a 20°C.	88
Figura 4.7. Resultados promedio de los principales parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix para las condiciones no acondicionado (No acond) y sometidas a daño por humedad (Inm): a) carga máxima (F_{max}), b) índice de rigidez a la tracción (IRT), c) energía de rotura (G_F), d) índice de tenacidad (IT) y e) desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico ($d_{0,5PM}$).	90
Figura 4.8. Resultados promedio de los principales parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix para las condiciones no acondicionado (No acond) y sometidas a daño por humedad (Húmedas): a) carga máxima (F_{max}), b) índice de rigidez a la tracción (IRT), c) energía de rotura (G_F), d) índice de tenacidad (IT) y e) desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico ($d_{0,5PM}$).	94
Figura 4.9. Resultados del ensayo a tracción indirecta de una probeta representativa no acondicionada (No acond) y otra sometida a daño por humedad (Húmeda), donde ITS es la resistencia a tracción indirecta e ITSr es el ratio de resistencia a la tracción indirecta.	96
Figura 4.10. Valores del Índice de Rigidez a la Tracción (IRT) con respecto a la temperatura para la mezcla fabricada con los betunes 50/70 y PMB 45/80-65 en las condiciones: no acondicionada (No acond), envejecida (Env) y envejecida y sometida a la acción del agua (Env + Húm).	97
Figura 4.11. Valores del desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico ($d_{0,5PM}$) con respecto a la temperatura para la mezcla fabricada con los betunes 50/70 y PMB 45/80-65 en las condiciones: no acondicionada (No acond), envejecida (Env) y envejecida y sometida a la acción del agua (Env + Húm).	97

Figura 4.12. Valores promedio de resistencia a la tracción indirecta para la mezcla de referencia (REF) y la mezcla modificada con nanoarcilla (BENT) o con nanopartículas de hierro (NFER), en las condiciones: no acondicionado (No acond), sometido a daño por humedad (Húmedas), envejecidas mediante LTOA o TEAGE (LTOA o TEAGE) y envejecidas mediante LTOA o TEAGE y sometidas a daño por humedad (LTOA + Húm o TEAGE + Húm).	101
Figura 4.13. Valores promedio del índice de rigidez a la tracción (IRT) para la mezcla de referencia (REF) y la mezcla modificada con nanoarcilla (BENT) o con nanopartículas de hierro (NFER), en las condiciones: no acondicionado (No acond), sometido a daño por humedad (Húmedas), envejecidas mediante LTOA o TEAGE (LTOA o TEAGE) y envejecidas mediante LTOA o TEAGE y sometidas a daño por humedad (LTOA + Húm o TEAGE + Húm).	102
Figura 4.14. Valores promedio de desplazamiento cuando se alcanza la carga máxima en el ensayo de tracción indirecta para la mezcla de referencia (REF) y la mezcla modificada con nanoarcilla (BENT) o con nanopartículas de hierro (NFER), en las condiciones: no acondicionado (No acond), sometido a daño por humedad (Húmedas), envejecidas mediante LTOA o TEAGE (LTOA o TEAGE) y envejecidas mediante LTOA o TEAGE y sometidas a daño por humedad (LTOA + Húm o TEAGE + Húm).	102
Figura 4.15. Valores promedio de energía elástica en el ensayo de tracción indirecta para la mezcla de referencia (REF) y la mezcla modificada con nanoarcilla (BENT) o con nanopartículas de hierro (NFER), en las condiciones: no acondicionado (No acond), sometido a daño por humedad (Húmedas), envejecidas mediante LTOA o TEAGE (LTOA o TEAGE) y envejecidas mediante LTOA o TEAGE y sometidas a daño por humedad (LTOA + Húm o TEAGE + Húm).	103
Figura 4.16. Valores promedio del índice de envejecimiento para la mezcla de referencia (REF) y la mezcla con betún modificado con nanoarcilla (BENT) o con nanopartículas de hierro (NFER), en las condiciones: envejecidas mediante LTOA o TEAGE (LTOA o TEAGE) y envejecidas mediante LTOA o TEAGE y sometidas a daño por humedad (LTOA + Húm o TEAGE + Húm).	104
Figura 4.17. Valores promedio de la relación de resistencia a tracción indirecta (ITSR) entre las mezclas no acondicionadas y húmedas (No envejecidas) y las mezclas no acondicionadas y envejecidas mediante LTOA o TEAGE (LTOA o TEAGE), para los casos de la mezcla de referencia (REF) y la mezcla modificada con nanoarcilla (BENT) o con nanopartículas de hierro (NFER).	106
Figura 4.18. Valores promedio de la relación de resistencia a la tracción indirecta (ITSR) entre las mezclas no acondicionadas y envejecidas mediante LTOA o TEAGE sometidas a daño por humedad para los casos de la mezcla de referencia (REF) y la mezcla modificada con nanoarcilla (BENT) o con nanopartículas de hierro (NFER).	107
Figura 4.19. Probetas antes y después de someterlas a envejecimiento mediante TEAGE.	107
Figura 4.20. Manchas después del procedimiento de envejecimiento TEAGE.	108
Figura 4.21. Evolución del módulo con el número de ciclos en el ensayo EBADE a 20°C de las probetas representativas de la mezcla AC16S fabricada con 50/70 en las condiciones: no acondicionada (No acond) y envejecida.	109
Figura 4.22. Evolución de la DED con el número de ciclos en el ensayo EBADE a 20°C de las probetas representativas de la mezcla AC16S fabricada con 50/70 en las condiciones: no acondicionada (No	

acond) y envejecida.....	109
Figura 4.23. Valores de deformación de fallo (ϵ_{fallo}) frente al módulo inicial (E_i) en el ensayo EBADE a 20, 5 y -5°C, para la mezcla no acondicionada (No acond) y envejecida (Env), fabricada con los betunes: 50/70 y PMB 45/80-65.	112
Figura 4.24. Valores del índice de envejecimiento para los parámetros del ensayo EBADE a las temperaturas de 20, 5 y -5°C: a) Módulo inicial y b) deformación de fallo.	112
Figura 4.25. Valores de deformación de fallo (ϵ_{fallo}) frente al módulo inicial (E_i) del ensayo EBADE a 20°C para la mezcla no acondicionada (No acond) y envejecida (Env) fabricada con árido calizo y árido granítico.	113
Figura 4.26. a) Evolución del módulo y b) evolución de la DED con el número de ciclos en el ensayo EBADE a 20°C de las probetas representativas de la mezcla AC16S fabricada con PMB 45/80-65 en las condiciones: no acondicionada (No acond) y sometida a daño por humedad (Húmeda).....	114
Figura 4.27. Valores de deformación de fallo frente a módulo inicial de la mezcla fabricada con betún 50/70 y árido calizo (Calizo 50/70), con betún PMB 45/80-65 y árido calizo (Calizo PMB), betún 50/70 y árido granítico (Granítico 50/70) y, betún 50/70 y árido granítico usando un filler arcilloso (Granítico + arc 50/70) para las condiciones: no acondicionada (No acond), envejecida (Env) y envejecida sometida a daño por humedad (Env + Húm).....	119
Figura 4.28. Evolución de la DED con el número de ciclos. Ensayo EBADE a 20°C y 10 Hz. Mezcla AC16S con ligante 50/70.	122
Figura 4.29. Evolución de la DED con el número de ciclos. Ensayo EBADE a 20°C y 10 Hz. Mezcla AC16S con ligante PMB 45/80-65.	123
Figura 4.30. Evolución del módulo con el número de ciclos. Ensayo EBADE a 20°C y 10 Hz.	124
Figura 4.31. Evolución del módulo de una probeta representativa en el ensayo de barrido de tiempo para los diferentes escalones de deformación: a) betún 50/70 y b) PMB 45/80-65.	125
Figura 4.32. Leyes de fatiga a partir del ensayo de barrido de tiempo.	126
Figura 4.33. Evolución del módulo con el número de ciclos y fallo a partir del criterio convencional. Barrido de tiempo a deformación de 275 $\mu\text{m}/\text{m}$. Betún PMB 45/80-65.	126
Figura 4.34. Diferenciación del módulo en tres fases y criterio de fallo [308].	127
Figura 4.35. Evolución de la DED con el número de ciclos y fallo al 50% de la $DED_{\text{máx}}$. Barrido de tiempo a deformación de 275 $\mu\text{m}/\text{m}$. Betún PMB 45/80-65.	127
Figura 4.36. Evolución del ratio de cambio de la energía disipada (RDEC).....	128
Figura 4.37. Cálculo del área bajo la curva de energía disipada (SDE). Barrido de tiempo a deformación 275 $\mu\text{m}/\text{m}$. Betún PMB 45/80-65.....	128
Figura 4.38. Cálculo del área trapezoidal (AT) obtenido al unir la energía disipada inicial con la energía disipada en cada ciclo. Barrido de tiempo a deformación 275 $\mu\text{m}/\text{m}$. Betún PMB 45/80-65.	129
Figura 4.39. Evolución de ΔA con el número de ciclos y fallo a partir del criterio de fallo RDEC. Barrido de tiempo a deformación 275 $\mu\text{m}/\text{m}$. Betún PMB 45/80-65.	129
Figura 4.40. Leyes de fatiga obtenidas a partir de los distintos criterios de fallo considerados. Betún 50/70.	130
Figura 4.41. Leyes de fatiga obtenidas a partir de los distintos criterios de fallo considerados. Betún PMB	

45/80-65.....	130
Figura 4.42. Módulo inicial promedio para los diferentes escalones de deformación considerados en el cálculo de las leyes de fatiga. Betunes 50/70 y PMB 45/80-65.	131
Figura 4.43. Evolución del módulo con el número de ciclos. Diferentes criterios de fallo considerados. Barrido de tiempo a 275 $\mu\text{m/m}$. Betún PMB 45/80-65.	131
Figura 4.44. Leyes de fatiga a partir del criterio de fallo de la 3ª Fase del módulo. Mezcla fabricada con betún 50/70 y PMB 45/80-65.....	132
Figura 4.45. Comparativa de la evolución del módulo en el ensayo de barrido de tiempo y en el ensayo de barrido de deformaciones: a) 50/70 y b) PMB 45/80-65.....	133
Figura 4.46. Comparativa de la evolución de la DED en el ensayo de barrido de tiempo y en el ensayo de barrido de deformaciones: a) 50/70 y b) PMB 45/80-65.....	134
Figura 4.47. Variación de la DED respecto al módulo en el ensayo de barrido de tiempo y en el ensayo de barrido de deformaciones: a) Betún 50/70 y b) Betún PMB 45/80-65.....	135
Figura 4.48. Ejemplo de la determinación de la deformación de no fallo y de fallo a partir de los valores de DED del ensayo EBADE [314].....	137
Figura 4.49. Evolución de la pendiente $\Delta\text{DED}/\Delta\text{Ciclos}$ con la amplitud de deformación en el ensayo EBADE. Mezcla AC16S fabricada con betún 50/70 y con betún PMB 45/80-65.	137
Figura 4.50. Leyes de fatiga obtenidas mediante el ensayo de barrido de tiempo frente a las leyes estimadas a partir del ensayo EBADE. Mezcla AC16S fabricada con 50/70 y PMB 45/80-65.....	138
Figura 4.51. Evolución de la DED con el número de ciclos de una probeta representativa de los distintos casos de estudio: a) mezcla no acondicionada fabricada con betún 50/70, b) mezcla envejecida fabricada con 50/70, c) mezcla no acondicionada fabricada con betún PMB 45/80-65 y d) mezcla envejecida fabricada con PMB 45/80-65. Temperaturas de ensayo: 20, 5 y -5°C	140
Figura 4.52. Leyes de fatiga estimadas. Temperaturas de ensayo: 20, 5 y -5°C . Mezcla no acondicionada con betún 50/70.....	142
Figura 4.53. Leyes de fatiga estimadas. Temperaturas de ensayo: 20, 5 y -5°C . Mezcla no acondicionada con betún PMB 45/80-65.	142
Figura 4.54. Leyes de fatiga estimadas para la mezcla envejecida: a) Mezcla con betún 50/70 y b) Mezcla con betún PMB 45/80-65. Temperaturas de ensayo: 20, 5 y -5°C	143
Figura 4.55. Secciones de firme consideradas (medidas en mm). MB: mezcla bituminosa y ZA: zahorra.	145
Figura 4.56. Relación entre el módulo en 5.000 ciclos en el ensayo de barrido de tiempo para una determinada deformación y el módulo al final del escalón de esa misma deformación en el ensayo EBADE.	146
Figura 4.57. Ilustración del proceso iterativo seguido.....	147
Figura 4.58. Evolución del módulo con el número de ciclos de una probeta representativa de la mezcla fabricada con ligante 50/70 en las condiciones: no acondicionada y 100% envejecida, y evolución estimada del módulo de la misma mezcla para los grados de envejecimiento: 25, 50 y 75%.....	149
Figura 4.59. Leyes de fatiga para la mezcla fabricada con ligante 50/70, ensayada a 20°C , no acondicionada, envejecida y considerando distintos grados de envejecimiento: 25, 50 y 75%.	150

Figura 4.60. Evolución del módulo de una probeta representativa para cada una de las distintas deformaciones impuestas (deformaciones en $\mu\text{m/m}$). Mezcla AC16S, no acondicionada, fabricada con betún 50/70.....	154
Figura 4.61. Evolución del módulo de una probeta representativa para cada una de las distintas deformaciones impuestas (deformaciones en $\mu\text{m/m}$). Mezcla AC16S, envejecida, fabricada con betún 50/70.	154
Figura 4.62. Evolución del módulo de una probeta representativa para cada una de las distintas deformaciones impuestas (deformaciones en $\mu\text{m/m}$). Mezcla AC16S, no acondicionada, fabricada con betún PMB 45/80-65.....	154
Figura 4.63. Evolución del módulo de una probeta representativa para cada una de las distintas deformaciones impuestas (deformaciones en $\mu\text{m/m}$). Mezcla AC16S, envejecida, fabricada con betún PMB 45/80-65.....	155
Figura 4.64. Leyes de fatiga en el ensayo a flexotracción de dos puntos (2PB).....	156
Figura 4.65. Leyes de fatiga obtenidas mediante el criterio convencional de fallo. Ensayos de tracción-compresión (TC) y a flexotracción de dos puntos (2PB). Mezcla no acondicionada fabricada con los betunes 50/70 y PMB 45/80-65.....	156
Figura 4.66. Leyes de fatiga a partir de los ensayos de tracción-compresión (TC) y flexotracción de dos puntos (2PB) según los criterios de fallo del 50% del módulo inicial, del ratio de cambio de la energía disipada (RDEC), del 50% de la DED máxima y de la 3ª fase del módulo. Mezcla fabricada con betún 50/70.	157
Figura 4.67. Representación típica de las tres regiones del RDEC [313]......	158
Figura 4.68. Evolución de la energía disipada y curva de regresión. Ensayo a flexotracción de dos puntos. Deformación de 350 $\mu\text{m/m}$. Mezcla AC16S con betún 50/70.	158
Figura 4.69. Relación entre el <i>plateau value</i> y el número de ciclos al 50% del módulo inicial. Mezclas no acondicionadas (No acond) y envejecidas (Env). Ensayo de tracción-compresión (TC) y a flexotracción de dos puntos (2PB). Mezcla AC16S fabricada con los betunes 50/70 y PMB 45/80-65.....	159
Figura 4.70. Evolución del módulo con el número de ciclos en el ensayo EBADE a 20°C: a) sin periodos de reposo (la deformación aumenta progresivamente) y b) con retorno a la deformación inicial al final de cada escalón de carga. Mezcla BBTM 11A fabricada con los ligantes 50/70 y PMB 45/80-65.	161
Figura 4.71. Evolución del módulo con el número de ciclos en el ensayo EBADE a 20°C con retorno a la deformación inicial al final de cada escalón de deformación. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 15/25.	162
Figura 4.72. Evolución del módulo con el número de ciclos en el ensayo EBADE a -5°C con retorno a la deformación inicial al final de cada escalón de deformación. Mezcla BBTM 11A fabricada con los betunes 15/25 y 50/70.	162
Figura 4.73. Evolución del módulo con el número de ciclos en el ensayo EBADE a 20°C con retorno a la deformación inicial al final de cada escalón de deformación. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70, envejecida.	163
Figura 4.74. Evolución del módulo con el número de ciclos en el ensayo EBADE a 5°C con retorno a la deformación inicial al final de cada escalón de deformación. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún	

50/70, envejecida.	164
Figura 4.75. Evolución de la DED en el ensayo EBADE a 20°C con retorno a la deformación inicial al final de cada escalón de deformación. Probeta representativa de la mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70.....	165
Figura 4.76. Esquema representativo del ensayo de barrido de tiempo introduciendo periodos de reposo de 10 min cada 200 ciclos de carga.	166
Figura 4.77. Evolución del módulo en un ensayo de barrido de tiempo, frente al obtenido introduciendo periodos de reposo de 10 minutos cada 200 ciclos de carga. Caso 1: ensayos a 200 $\mu\text{m/m}$, 20°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70.....	167
Figura 4.78. Evolución del módulo en un ensayo de barrido de tiempo frente al obtenido introduciendo periodos de reposo de 10 minutos cada 200 ciclos de carga. Caso 2: ensayos a 100 $\mu\text{m/m}$, 5°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70.	168
Figura 4.79. Evolución del módulo en un ensayo de barrido de tiempo frente al obtenido introduciendo periodos de reposo de 10 minutos cada 200 ciclos de carga. Caso 3: ensayos a 125 y 150 $\mu\text{m/m}$, 5°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70.....	168
Figura 4.80. Evolución de la tensión con el número de ciclos en el ensayo EBADE a 5°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70.	169
Figura 4.81. Evolución de la tensión en un ensayo de barrido de tiempo frente a la obtenida introduciendo periodos de reposo de 10 minutos cada 200 ciclos de carga. Caso 2: ensayos a 100 $\mu\text{m/m}$, 5°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70.....	170
Figura 4.82. Evolución de la tensión en el ensayo de barrido de tiempo frente a la obtenida introduciendo periodos de reposo de 10 minutos cada 200 ciclos. Caso 3: ensayos a 125 y 150 $\mu\text{m/m}$, 5°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70.	170
Figura 4.83. Evolución de la DED en el ensayo de barrido de tiempo con y sin introducir periodos de reposo de 10 minutos cada 200 ciclos. Caso 2: ensayos a 100 $\mu\text{m/m}$, 5°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70.	171
Figura 4.84. Evolución de la DED en el ensayo de barrido de tiempo con y sin introducir periodos de reposo de 10 minutos cada 200 ciclos. Caso 1: ensayos a 200 $\mu\text{m/m}$, 20°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70.	171
Figura 4.85. Evolución del módulo en el ensayo de barrido de tiempo frente a la obtenida introduciendo periodos de reposo de 5 minutos cada 200 ciclos. Caso 4: ensayos a 225 $\mu\text{m/m}$, 20°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70.	172
Figura 4.86. Evolución del módulo en el ensayo de barrido de tiempo frente a la obtenida introduciendo periodos de reposo de 5 minutos cada 200 ciclos. Caso 5: ensayos a 100 $\mu\text{m/m}$, 20°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 15/25.	173
Figura 4.87. Evolución del módulo en el ensayo de barrido de tiempo frente a la obtenida introduciendo periodos de reposo de 5 minutos cada 200 ciclos. Caso 6: ensayos a 125 $\mu\text{m/m}$, 20°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A envejecida, fabricada con betún 50/70.	173
Figura 4.88. Evolución del módulo en el ensayo de barrido de tiempo introduciendo periodos de reposo de 60 minutos cada 50.000 ciclos. Caso 7: ensayo a 100 $\mu\text{m/m}$, 20°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A	

fabricada con betún 15/25. 174

Índice de tablas

Tabla 2.1. Métodos de envejecimiento de betunes [2].....	17
Tabla 2.2. Métodos de envejecimiento en mezclas asfálticas (modificado a partir de Airey [2]).	18
Tabla 2.3. Mecanismos de daño por humedad.....	23
Tabla 2.4. Factores que influyen en el daño por humedad.	27
Tabla 2.5. Ensayos de daño por humedad que consideran la carga de tráfico.	33
Tabla 2.6. Ensayos de <i>stripping</i> para mezclas sueltas (modificado a partir de [181]).....	34
Tabla 2.7. Ensayos de daño por humedad para mezclas bituminosas compactadas [181].....	35
Tabla 2.8. Ensayos desarrollados para obtener las propiedades de fractura en las mezclas bituminosas (modificado a partir de Valdés [250]).	43
Tabla 2.9. Comparación entre los dos modos de carga [238].	52
Tabla 2.10. Configuraciones de los ensayos de fatiga comúnmente empleados para evaluar mezclas bituminosas (modificado a partir de Alonso [271]).	53
Tabla 3.1. Características de los betunes utilizados en la mezcla AC16S.	57
Tabla 3.2. Características de los betunes utilizados en la mezcla AC14.	58
Tabla 4.1. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de probetas de mezcla AC16S fabricadas con árido calizo, no acondicionadas y envejecidas.	81
Tabla 4.2. Resultados del ensayo Fénix para probetas no acondicionadas y probetas envejecidas. Betún 50/70.	82
Tabla 4.3. Resultados del ensayo Fénix para probetas no acondicionadas y probetas envejecidas. Betún PMB 45/80-65.....	82
Tabla 4.4. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla no acondicionada y la mezcla envejecida ensayada a 20°C.	84
Tabla 4.5. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de las probetas de mezcla AC16S para ser sometidas a daño por humedad.	88
Tabla 4.6. Resultados del ensayo Fénix para probetas no acondicionadas (No acond) y probetas sometidas a daño por humedad (Húmedas). Mezcla fabricada con betún 50/70.....	89
Tabla 4.7. Resultados del ensayo Fénix para probetas no acondicionadas (No acond) y probetas sometidas a daño por humedad (Húmedas). Mezcla fabricada con betún PMB 45/80-65.....	89
Tabla 4.8. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla no acondicionada y la mezcla sometida a daño por humedad. Mezcla con betún 50/70.....	91
Tabla 4.9. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla no acondicionada y la mezcla sometida a daño por humedad. Mezcla con betún PMB 45/80-65.....	92
Tabla 4.10. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de probetas de mezcla AC16S fabricadas con árido granítico.	93
Tabla 4.11. Resultados del ensayo Fénix a 20°C para probetas fabricadas con árido granítico, no acondicionadas (No acond) y sometidas a daño por humedad (Húmedas).	93
Tabla 4.12. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla no acondicionada y la mezcla sometida a	

daño por humedad. Mezcla fabricada con árido granítico, ensayada a 20°C.	95
Tabla 4.13. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de probetas de mezcla AC16S envejecidas fabricadas con árido calizo para ser sometidas a daño por humedad.	96
Tabla 4.14. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla envejecida y la mezcla envejecida sometida a daño por humedad. Mezcla con betún 50/70.	98
Tabla 4.15. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla envejecida y la mezcla envejecida sometida a daño por humedad. Mezcla con betún PMB 45/80-65.	99
Tabla 4.16. Porcentaje de huecos promedio de las probetas de mezcla AC14.	100
Tabla 4.17. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de probetas de mezcla AC16S fabricadas con árido calizo, no acondicionadas y envejecidas.	108
Tabla 4.18. Resultados del ensayo EBADE para probetas no acondicionadas (No acond) y probetas envejecidas. Mezcla fabricada con betún 50/70.	110
Tabla 4.19. Resultados del ensayo EBADE para probetas no acondicionadas y probetas envejecidas. Mezcla fabricada con betún PMB 45/80-65.	110
Tabla 4.20. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla no acondicionada y la mezcla envejecida ensayada mediante EBADE a 20°C.	111
Tabla 4.21. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de probetas de mezcla AC16S fabricadas con árido granítico, no acondicionadas y envejecidas.	113
Tabla 4.22. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla fabricada con árido calizo y con árido granítico, y ligante 50/70, ensayada mediante EBADE a 20°C.	113
Tabla 4.23. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de probetas de mezcla AC16S fabricadas con árido calizo, no acondicionadas y para ser sometidas a daño por humedad (Húmedas).	114
Tabla 4.24. Resultados del ensayo EBADE a 20°C para probetas de mezcla no acondicionadas (No acond) y probetas sometidas a daño por humedad (Húmedas). Mezcla fabricada con árido calizo.	115
Tabla 4.25. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla fabricada con árido calizo, no acondicionada y la misma sometida a daño por humedad, ensayada mediante EBADE a 20°C.	115
Tabla 4.26. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de probetas de mezcla AC16S fabricadas con árido granítico y betún 50/70, no acondicionadas y para ser sometidas a daño por humedad (Húmedas).	115
Tabla 4.27. Resultados del ensayo EBADE a 20°C para probetas de mezcla fabricada con árido granítico y betún 50/70, no acondicionada (No acond) y sometida a daño por humedad (Húmedas).	116
Tabla 4.28. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla no acondicionada y la mezcla sometida a daño por humedad ensayada mediante EBADE a 20°C. Mezcla fabricada con árido granítico y betún convencional.	116
Tabla 4.29. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de probetas de mezcla AC16S fabricadas con árido granítico, fíller arcilloso y betún 50/70, no acondicionadas y para ser sometidas a daño por humedad (Húmedas).	116
Tabla 4.30. Resultados del ensayo EBADE a 20°C para probetas de mezcla fabricada con árido granítico, fíller arcilloso y betún 50/70, en las condiciones: no acondicionada (No acond) y sometida a daño por humedad (Húmedas).	117

Tabla 4.31. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla no acondicionada y la mezcla sometida a daño por humedad ensayada mediante EBADE a 20°C. Mezcla fabricada con árido granítico, filler arcilloso y betún convencional.....	117
Tabla 4.32. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de probetas de mezcla AC16S fabricada con árido calizo y betún convencional, no acondicionadas y para ser sometidas a daño por humedad (Húmedas).....	117
Tabla 4.33. Resultados del ensayo EBADE a 20°C para probetas de mezcla fabricada con árido calizo y betún 50/70, en las condiciones: no acondicionada (No acond) y sometida a daño por humedad con un acondicionamiento más agresivo (Húmedas).....	118
Tabla 4.34. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla no acondicionada y la mezcla sometida a daño por humedad con un acondicionamiento más agresivo, ensayada mediante EBADE a 20°C. Mezcla fabricada con árido calizo y betún 50/70.....	118
Tabla 4.35. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de probetas de mezcla AC16S envejecidas para ser sometidas a daño por humedad.....	119
Tabla 4.36. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla envejecida y la mezcla sometida a daño por humedad ensayada mediante EBADE a 20°C. Mezcla fabricada con árido calizo y betún PMB 45/80-65.....	119
Tabla 4.37. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla envejecida y la mezcla sometida a daño por humedad ensayada mediante EBADE a 20°C. Mezcla fabricada con árido calizo, árido granítico o árido granítico y filler arcilloso y betún 50/70.....	120
Tabla 4.38. Valores promedio de los resultados obtenidos a partir del ensayo EBADE para la mezcla AC16S.....	139
Tabla 4.39. Valores de deformación de no fallo y deformación de fallo promedio de los obtenidos a partir de los resultados del ensayo EBADE.....	141
Tabla 4.40. Ecuaciones de las leyes de fatiga para los diferentes casos de estudio.....	144
Tabla 4.41. Deformaciones horizontales y vida a fatiga calculados a partir de las leyes de fatiga.....	145
Tabla 4.42. Deformaciones y vida a fatiga obtenidos a partir del proceso iterativo.....	148
Tabla 4.43. Deformaciones y vida a fatiga obtenidos a partir del proceso iterativo considerando el efecto del envejecimiento durante la vida a fatiga de la mezcla.....	151
Tabla 4.44. Densidad aparente y porcentaje de huecos promedio de probetas trapezoidales de mezcla AC16S, no acondicionadas y envejecidas.....	152
Tabla 4.45. Escalones de deformación del ensayo EBADE y deformaciones consideradas en los ensayos a flexotracción de dos puntos.....	152
Tabla 4.46. Valores de módulo inicial para los distintos niveles de deformación considerados.....	153
Tabla 4.47. Resultados del análisis de varianza de los resultados de módulo inicial en función de la deformación.....	153
Tabla 4.48. Leyes de fatiga del ensayo a flexotracción de dos puntos.....	155
Tabla 4.49. Porcentaje de huecos promedio de probetas de mezcla BBTM.....	160
Tabla 4.50. Casos estudiados en el análisis del efecto de la introducción de periodos de reposo en un ensayo de barrido de tiempo.....	164

Capítulo 1.

Introducción y objetivos

1. Planteamiento del problema y justificación de la tesis

En la actualidad, las infraestructuras viarias son el modo de transporte más usado en nuestra sociedad. Éstas son de gran importancia, ya que promueven el desarrollo y la calidad de vida de las personas, influyendo en los distintos sectores económicos y permitiendo la accesibilidad entre distintos puntos, lo que posibilita el desplazamiento de personas y mercancías. Por este motivo, su construcción y mantenimiento son esenciales. El estado de las carreteras es un factor que afecta en un alto porcentaje al nivel de costes del transporte, los cuales influyen sobre los flujos de comercio nacional e internacional, por lo que se debe garantizar su funcionalidad, teniendo en cuenta la seguridad y la comodidad de los usuarios que circulan por ellas.

El elemento que sostiene el tráfico vehicular y peatonal de una vía o camino es el firme. A éste se le exige durante su vida de servicio, por un lado, una buena capacidad soporte y, por otro, que mantenga una superficie de rodadura cómoda y adecuada para la circulación. Debido a su elevado coste, tanto de ejecución como de mantenimiento, resulta de gran importancia conocer detalladamente el comportamiento de los materiales que lo forman para poder determinar sus reacciones una vez en servicio, así como su vida útil y sus necesidades de mantenimiento.

En España, el material más usado para su construcción son las mezclas asfálticas, cuya principal característica es la capacidad que ofrecen a deformarse viscoelásticamente bajo cargas

de larga duración (variaciones térmicas) y elásticamente bajo cargas de rápida aplicación (tráfico); todo ello, con un coste económico de implementación significativamente inferior al de los firmes rígidos [1].

Una vez el firme se pone en funcionamiento, éste poco a poco va perdiendo sus propiedades, su resistencia y su funcionalidad debido a diversos factores que influyen en su deterioro. Los dos factores más importantes son las cargas del tráfico y los agentes meteorológicos.

Por una parte, la repetición de las cargas del tráfico, muy inferiores a la carga de rotura, puede generar su fisuración por fatiga, por lo que el estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas frente a la fatiga es clave para mantener y mejorar las infraestructuras viarias. Por otra parte, las condiciones ambientales como la temperatura, las precipitaciones o la radiación solar también influyen significativamente en la fisuración de los pavimentos asfálticos. Las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas se ven alteradas con el tiempo por efecto de estos agentes.

El envejecimiento y el daño por humedad son dos de los principales factores que afectan a la durabilidad de las mezclas asfálticas [2, 3]. Estos dos factores provocan el bajo rendimiento de la mezcla al debilitar la unión adhesiva entre el ligante y los áridos, llegando a provocar su fallo prematuro [4]. Por este motivo, resulta de especial relevancia analizar el comportamiento de las mezclas asfálticas para que sean capaces no sólo de resistir las solicitaciones del tráfico, sino también la acción de las condiciones ambientales, investigando cuidadosamente todas las variables que influyen en el envejecimiento y en el daño por humedad.

Los mecanismos de fisuración se pueden analizar desde dos puntos de vista: desde el punto de vista de la respuesta mecánica de la mezcla frente a la aplicación de una carga a velocidad constante y monótona, es decir, mediante el análisis de la resistencia a la fractura del material, o desde el punto de vista de la evaluación de la resistencia a la fatiga del material, analizando la respuesta mecánica de la mezcla frente a la repetición de cargas cíclicas muy inferiores a las de la resistencia máxima del material.

La existencia de ensayos de laboratorio mediante los cuales simular el comportamiento in situ de las mezclas frente a fisuración resulta fundamental. Un modelo completamente fiel debería reproducir los efectos de la variación de la temperatura, la velocidad y el tiempo de carga y reposo al cual son sometidas las mezclas bituminosas en las carreteras. Sin embargo, los ensayos actuales no se adaptan a las condiciones reales a las que se encuentra el material en la carretera, ni en la forma de aplicación de las cargas, ni en el material utilizado para el ensayo, ni en las condiciones de contorno [5]. Es por ello que en la actualidad no existe un procedimiento de ensayo universal que lo caracterice por completo. Por este motivo, el Laboratorio de

Caminos de la Universidad Politécnica de Catalunya ha desarrollado recientemente los ensayos Fénix y EBADE, los cuales pretenden mejorar el estudio del comportamiento a fisuración de las mezclas asfálticas.

El ensayo Fénix es un ensayo monotónico a tracción mediante el cual es posible evaluar la respuesta de la mezcla durante su proceso de rotura. Este ensayo permite simular el mecanismo de fisuración de las mezclas asfálticas, presentándose como un ensayo fácil de realizar, tanto a probetas tipo Marshall, como a testigos extraídos del pavimento.

Normalmente, el estudio en laboratorio del comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas se realiza mediante ensayos clásicos de barrido de tiempo. En estos ensayos la probeta de mezcla bituminosa es sometida a un ensayo cíclico mediante el cual se aplica una cierta sollicitación (tensión o deformación) repetida hasta que se produce la rotura de la probeta. Para poder evaluar el comportamiento a fatiga de la mezcla se han de realizar diversos ensayos bajo distintas sollicitaciones. Esto supone un gran coste en tiempo debido a la realización de los ensayos requeridos. Por este motivo, estudiar la influencia de factores tales como la temperatura de ensayo, el tipo de ligante, el contenido de ligante o fenómenos como el envejecimiento o el daño por humedad resultan imposibles de realizar por el tiempo necesario para la ejecución de los ensayos.

El ensayo cíclico de barrido de deformaciones (EBADE) permite caracterizar la resistencia a fisuración de las mezclas bituminosas y determinar algunos parámetros que gobiernan el proceso de fatiga (Densidad de Energía Disipada, DED). Éste ensayo presenta una serie de ventajas frente a los ensayos clásicos de fatiga, como la reducción sustancial de la duración de los ensayos al limitar el número de ciclos para cada nivel de deformación. Además, a partir de un solo ensayo es posible obtener información sobre el comportamiento del material bajo diferentes niveles de deformación. Así, es posible obtener valores de deformación que no producen daño a la mezcla y valores que provocan su fallo instantáneamente. Otra de las ventajas de este ensayo es que permite realizarse para un amplio rango de temperaturas. Es por este motivo por lo que el ensayo EBADE se presenta como una buena opción en el estudio del efecto del envejecimiento y del daño por humedad en el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas.

En este contexto, la presente tesis doctoral tiene como objetivo el estudio del efecto de los fenómenos de envejecimiento y de daño por humedad, así como de la temperatura, en la resistencia a la fisuración de las mezclas asfálticas, usando los ensayos Fénix y EBADE.

2. Objetivos

Este trabajo tiene su origen en uno de los problemas más importante a los que se enfrentan las infraestructuras viarias en la actualidad: el deterioro de los firmes por efecto del envejecimiento, el daño por humedad y la temperatura. Por este motivo, el objeto principal de esta investigación consiste en el estudio del efecto del envejecimiento, de la acción del agua y de la temperatura en la fisuración de las mezclas asfálticas. Para ello se han planteado una serie de objetivos concretos que se detallan a continuación:

- *Análisis del proceso de fisuración de las mezclas bituminosas mediante la aplicación de nuevos ensayos.* Se estudia la fisuración de la mezcla desde el punto de vista de la fractura y de la fatiga. El estudio de la fisuración por fractura se realiza mediante el ensayo Fénix, mientras que para estudiar la fisuración por fatiga se usa el ensayo EBADE. El proceso de fisuración de las mezclas asfálticas se estudia bajo diferentes acondicionamientos: no acondicionada, envejecida, sometida a daño por humedad y envejecida sometida a daño por humedad.

En la actualidad, los métodos de dimensionamiento estudian la fisuración bajo una determinada temperatura de referencia, sin considerar el efecto de esta variable en el comportamiento del firme. Es por ello que en este trabajo se pretende analizar el efecto de la temperatura de ensayo en el proceso de fisuración de las mezclas, tanto sin acondicionar, como acondicionadas.

- *Obtención de las leyes de fatiga de las mezclas asfálticas a partir del ensayo EBADE.* Durante la realización de la tesis se realiza un ensayo de barrido de tiempo a tracción-compresión sobre probetas prismáticas para obtener las leyes de fatiga de la mezcla. Los resultados de este ensayo se analizan y comparan con los obtenidos en el ensayo EBADE para la misma mezcla. Mediante la correlación de ambos ensayos se pretende obtener un procedimiento que permita relacionar el número de ciclos hasta rotura con la deformación aplicada mediante el ensayo EBADE, obteniendo un método de estimación de las leyes de fatiga a partir de este ensayo. La estimación de las leyes de fatiga a partir del ensayo EBADE permite reducir considerablemente el tiempo de ensayo, siendo posible considerar variables tales como la temperatura de ensayo o diferentes tipos de acondicionamiento.
- *Análisis del comportamiento a fatiga de las mezclas introduciendo periodos de reposo.* Se analiza la posibilidad de que las mezclas sometidas a un proceso de fatiga no estén experimentando un daño irreversible en los primeros niveles de amplitud de deformación, sino una reducción de módulo debido a efectos no lineales (tixotropía). Para ello, se realizan ensayos de barrido de tiempo con periodos de reposo mediante los cuales poder analizar la magnitud de este efecto.

3. Contenido

En este apartado se presentan los diversos capítulos en los cuales se divide y estructura el trabajo realizado durante el desarrollo de la tesis doctoral. En el capítulo 1, se presenta una breve justificación de la motivación para la realización de esta investigación, así como los objetivos definidos para el desarrollo de la misma.

El capítulo 2 recoge de forma resumida el estado del arte recopilado como base para el desarrollo de la tesis doctoral. En este capítulo se estudian en profundidad los fenómenos de envejecimiento y de daño por humedad en las mezclas asfálticas, y se revisa el fenómeno de la fisuración en las mezclas asfálticas.

El capítulo 3 recoge la metodología seguida durante la realización de la tesis doctoral. Este capítulo se estructura fundamentalmente en cuatro partes: en la primera de ellas se definen los materiales empleados durante el desarrollo de la investigación, a continuación se describen los procedimientos de acondicionamiento usados en este trabajo, después se explican los métodos de ensayo empleados y, la última parte recoge la planificación de los ensayos que se han llevado a cabo.

En el capítulo 4 se presentan y analizan los resultados obtenidos durante el desarrollo de la tesis. Se recogen los resultados obtenidos a partir del estudio del efecto de los fenómenos de envejecimiento y de la acción del agua, así como de la temperatura, en la resistencia a la fisuración de una mezcla bituminosa, evaluando su efecto tanto de forma independiente como conjunta. A continuación, se presenta un apartado en el cual se muestran y analizan los resultados obtenidos en los ensayos de barrido de deformaciones, describiéndose una metodología para estimar las leyes de fatiga a partir de este ensayo, la cual es validada mediante la obtención de las leyes de fatiga del mismo tipo de mezcla mediante la realización de ensayos de barrido de tiempo. Además, en este capítulo se muestran los resultados obtenidos en las estancias predoctorales realizadas durante el desarrollo de la tesis doctoral. En el último apartado de este capítulo, se recogen los resultados obtenidos al introducir periodos de reposo en el estudio de la fisuración por fatiga de las mezclas asfálticas, así como su posterior análisis.

A partir del análisis de los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta investigación se alcanzan una serie de conclusiones, las cuales, junto con las posibles futuras líneas de investigación, se recogen en el capítulo 5.

Por último, a continuación del capítulo 5, se recogen las referencias bibliográficas de este trabajo, así como los anexos.

Capítulo 2.

Estado del arte

El firme de las carreteras y, en especial, el pavimento sufren una degradación gradual con el paso de los vehículos, siendo la fisuración de las capas asfálticas uno de los mecanismos de deterioro más frecuentes en los firmes flexibles [6]. Además de las cargas mecánicas debidas al tráfico, las mezclas asfálticas que componen los pavimentos se encuentran sometidas a las condiciones ambientales. Estas variables ambientales son extremadamente importantes ya que tienen efectos significativos sobre las propiedades mecánicas de las mezclas y la vida útil del pavimento [7].

Los principales factores que afectan a la durabilidad de las mezclas asfálticas, asumiendo que se encuentran bien construidas, son el envejecimiento y el daño por humedad [2]. Estos dos factores conducen al debilitamiento de la unión adhesiva entre betún y áridos, lo cual provoca el fallo prematuro o bajo rendimiento de las mezclas bituminosas [4]. Es por ello que una mezcla asfáltica debe ser diseñada y construida no sólo para que resista las cargas impuestas por el tráfico, sino también la acción del medio ambiente.

Cuantificar la influencia que tiene el ambiente sobre el comportamiento de las mezclas bituminosas no es una tarea fácil. La forma como se realiza actualmente es separando cada uno de los componentes que lo conforman (agua, temperatura o rayos ultra-violeta, entre otros) y evaluar la influencia de cada uno de ellos (desde el punto de vista mecánico y químico) de manera separada sobre el ligante y las mezclas [8, 9, 10, 11, 12, 13]. Sin embargo, estos factores ambientales son dependientes entre sí. Tal y como demostraron Lu y Harvey [14, 15], la edad del pavimento tiene una alta influencia en el daño por humedad.

El objetivo de esta tesis doctoral es el estudio del efecto del envejecimiento y del daño por humedad en la fisuración de las mezclas asfálticas. Por ello, en este capítulo se presenta una

revisión bibliográfica de los siguientes temas:

- El fenómeno del envejecimiento: mecanismos asociados, variables intervinientes, parámetros y procedimientos de envejecimiento;
- El daño por humedad: adhesividad, patrones de fallo, mecanismos asociados, factores influyentes, manifestaciones de deterioro y métodos de acondicionamiento; y
- La fisuración en mezclas asfálticas: comportamiento de las mezclas a fractura y a fatiga.

1. El fenómeno del envejecimiento

El fenómeno del envejecimiento produce un cambio en el comportamiento reológico y en la composición de los betunes [16]. Éste se caracteriza principalmente por el endurecimiento del betún y puede tener dos efectos: por un lado, incrementar la capacidad de soporte de cargas y, por otro, aumentar la resistencia a la deformación de la mezcla, produciendo un aumento en los valores de rigidez o reduciendo la flexibilidad del firme.

Aunque el aumento de la rigidez hace que el material envejecido muestre menores deformaciones recuperables y permanentes (*rutting*) bajo cargas de tráfico, la pérdida de ductilidad de la mezcla la vuelve más propensa a daños por fatiga y pérdida de su potencial de recuperación. Por lo tanto, los pavimentos envejecidos generalmente fallan más rápido como resultado de la fisuración por fatiga [17, 18], Figura 2.1.

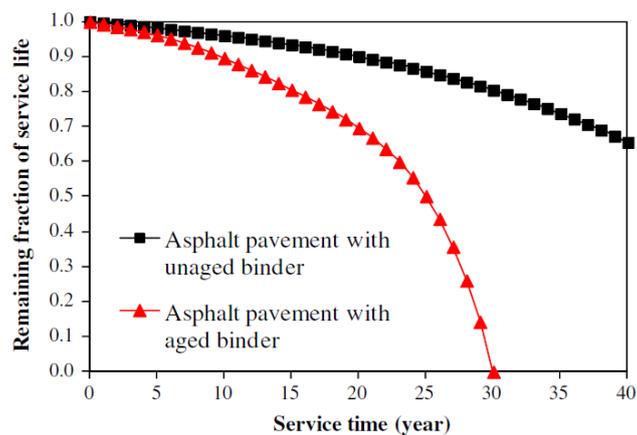


Figura 2.1. Representación esquemática del efecto del envejecimiento en la vida útil de los pavimentos asfálticos [7].

Por el contrario, diversos estudios concluyen que, a pesar de que el material admite menores deformaciones en tracción a medida que aumenta su rigidez, la vida a fatiga o el número de ciclos para que el material envejecido falle (N_f) aumenta [19, 20], Figura 2.2.

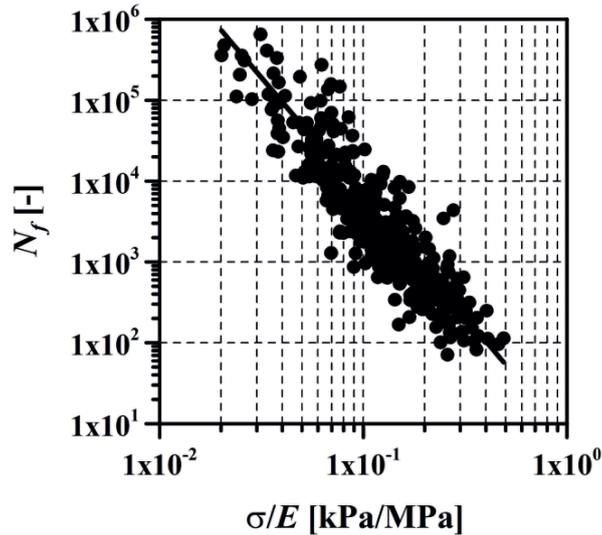


Figura 2.2. Evolución del número de ciclos de fallo con σ/E [19].

El envejecimiento de los materiales bituminosos es comúnmente expresado por el índice de envejecimiento [21]. La siguiente ecuación muestra la forma genérica del índice de envejecimiento (*Ageing Index*):

$$AgeingIndex = \frac{P_{AGED}}{P_{UNAGED}} \quad (2.1)$$

donde P_{UNAGED} se refiere a alguna propiedad física (por ejemplo, viscosidad, punto de reblandecimiento del betún y/o rigidez de la mezcla asfáltica) medida sobre el material no envejecido, y P_{AGED} sería la misma propiedad medida sobre el material después de haber sido envejecido.

1.1. Mecanismos asociados con el envejecimiento de las mezclas asfálticas

El envejecimiento del betún es un factor importante en el contexto de la resistencia a la fisuración de las mezclas asfálticas [22, 23]. Éste es una convergencia de varios procesos durante su vida útil [24] y se puede atribuir a envejecimiento químico y envejecimiento físico o endurecimiento estérico [25, 26].

El envejecimiento físico o endurecimiento estérico es el correspondiente al cambio en la orientación o reorganización de las moléculas en la estructura del betún y la lenta cristalización de ceras a temperatura ambiente [27]. Este es un proceso físico, ya que las propiedades reológicas del betún cambian sin modificar su composición química, que se puede revertir mediante la exposición al calor o al trabajo mecánico [28].

El envejecimiento químico es el más importante y complejo, y corresponde a la pérdida de volátiles, al endurecimiento debido a la exudación, y principalmente a un proceso de oxidación. La suma de estos tres procesos químicos conduce a un endurecimiento de la mezcla bituminosa [29], consecuencia del envejecimiento del betún, el cual se vuelve más duro y quebradizo [30]. Al contrario que el endurecimiento físico, este tipo de endurecimiento es irreversible.

El fenómeno de volatilización se define como la pérdida de peso del betún debido a la evaporación de sus componentes volátiles. Esta pérdida de peso, a su vez, reduce las propiedades de flujo del betún, es decir, su viscosidad. Los investigadores han encontrado que la viscosidad aumenta entre el 150 al 400% [31, 32]. Aunque la volatilización se produce principalmente durante la fabricación de las mezclas bituminosas, también puede ocurrir durante el almacenamiento, transporte y colocación.

El envejecimiento oxidativo se define como el fenómeno por el cual aparecen reacciones químicas graduales entre el oxígeno, difundido en el interior de la mezcla a través de los huecos de aire interconectados, y la interfaz árido-ligante [33, 34, 35]. Este fenómeno es uno de los factores más importantes que contribuyen al endurecimiento y fragilización de las mezclas, aumentando la rigidez de éstas, reduciendo su ductilidad, y pudiendo afectar a su resistencia a la fisuración [36], y a su vida a fatiga [7]. El proceso de oxidación ocurre principalmente durante el mezclado con los áridos y está relacionado con el tiempo, temperatura, huecos y espesor de la película de betún. Sin embargo, también tiene lugar, aunque en menor medida, durante el transporte, compactación y vida de servicio de las mezclas [27].

Cualquiera que sea el tipo de envejecimiento, se produce un endurecimiento cuyos efectos aumentan el riesgo de formación de grietas. El betún pierde su capacidad de relajar la tensión ante cargas de tráfico repetidas y ante procesos de enfriamiento [37]. Es por ello que los problemas de durabilidad de las mezclas se encuentran estrechamente vinculados a la capacidad del betún para resistir la oxidación y/o el endurecimiento físico.

Desde el punto de vista temporal, el envejecimiento sucede en dos etapas [38]. En la primera, denominada envejecimiento a corto plazo, la mezcla experimenta la volatilización y una parte de la oxidación de una manera muy rápida (el proceso es llevado a cabo en cuestión de horas). Mientras que en la segunda etapa, correspondiente al envejecimiento a largo plazo, el proceso es lento y sus efectos se detectan con el paso de los años. El envejecimiento a largo plazo se asocia exclusivamente con la degradación producida por el medio ambiente durante la vida de servicio de las mezclas. La Figura 2.3 muestra de manera esquemática las fases del envejecimiento.

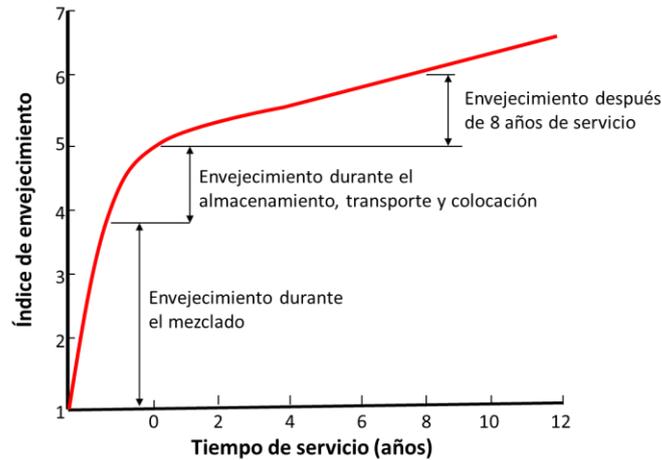


Figura 2.3. Etapas del proceso de envejecimiento [29].

1.2. Variables que intervienen en proceso de envejecimiento

El envejecimiento en las mezclas asfálticas es un fenómeno producido por la interacción de variables intrínsecas y extrínsecas, las cuales se describen a continuación.

Variables intrínsecas

Las variables intrínsecas son aquellas relacionadas con las características internas de las mezclas asfálticas, es decir, los materiales y las características de fabricación. Referido a los materiales se encuentran el betún y los áridos, mientras que el espesor de la película de betún, el porcentaje de huecos y la permeabilidad son características propias de la fabricación de la mezcla. La vida a fatiga dependerá de estas variables [39].

- **Betún:** las características de oxidación del ligante, así como la composición química inicial, condicionan el comportamiento y durabilidad del firme después de su construcción [40].
- **Áridos:** aunque algunos autores consideran que los áridos son materiales inertes que no influyen en el envejecimiento [41], otros hablan de que es importante estudiar la interacción entre el ligante y los áridos, ya que los áridos pueden afectar al envejecimiento del betún [42, 43, 44]. El elemento que tiene mayor influencia en el envejecimiento es el contenido de filler [45]. La incorporación del filler provoca que las propiedades del ligante varíen, haciendo que éste forme una capa más gruesa con unas condiciones de fluidez diferentes, mejorando la adherencia y aumentando espesor de película de betún que recubre los áridos, lo que ayuda a retardar el envejecimiento [46].
- **Espesor de la película de betún:** esta película es la que realmente va a verse afectada por el envejecimiento y, por lo tanto, es la que se endurece. Un espesor de la película de

betún adecuado produce una mayor resistencia al envejecimiento [27], y también una mejor resistencia a la fatiga [47].

- **Contenido de huecos:** generalmente es asumido que la tasa de envejecimiento es una función del contenido de huecos en las mezclas [48, 49, 50]. Mezclas con un alto contenido de huecos envejecen más rápido, aunque la tasa de envejecimiento depende de las propiedades del betún. Esto se debe a que el flujo de aire y agua a través de los huecos permite la oxidación del betún. Cuanto mayor sea la percolación de aire y agua en la capa, mayor será la oxidación del betún [28]. El tamaño y la distribución de los huecos de aire en las mezclas asfálticas dependen de las propiedades de los áridos, el diseño de la mezcla y el proceso de compactación.

Debe existir un equilibrio en la cantidad y distribución de los huecos de aire, ya que el exceso de ellos genera deformaciones y permite el paso de agua y vapor. Por el contrario, contenidos de huecos muy bajos producen deformaciones plásticas y problemas de exudación, entre otros.

Variables extrínsecas

- **Temperatura:** para la fabricación de la mezcla, el betún es calentado a temperaturas entre 150 y 170°C, temperatura a la cual se produce la volatilización de algunos componentes. Es por ello que la temperatura es sin duda el primer agente externo al cual es sometida la mezcla asfáltica para su elaboración [41]. La temperatura es una variable a controlar cuidadosamente en los procesos de producción, transporte y puesta en obra de las mezclas, ya que de exceder los valores mencionados se producirá un envejecimiento prematuro de las mezclas, lo que reduce su vida de servicio [51].
- **Radiación Solar:** la radiación solar es uno de los factores responsables del envejecimiento de los betunes, provocando la disminución en la vida útil de las mezclas asfálticas [52]. Debido al alto coeficiente de absorción de radiación del betún, la radiación solar afecta sólo a las capas superiores del pavimento asfáltico [2]; por ello, normalmente ha sido ignorada. Sin embargo, Durrieu, *et al.* [53] informan de que la influencia de la radiación ultravioleta sobre el envejecimiento de las capas superiores de pavimento bituminoso no puede ser ignorada, ya que la degradación es rápida. Araújo, *et al.* [52] observaron que las mezclas bituminosas envejecidas muestran signos de degradación en forma de alteraciones visibles en su superficie, como grietas y manchas blancas (Figura 2.4). Además concluyeron que la exposición del pavimento bituminoso a la radiación solar aumenta la porosidad del betún en mezclas bituminosas en caliente y acelera la degradación del pavimento, causando la eliminación del filler de relleno y un aumento en la probabilidad de inicio de la grieta.



Figura 2.4. Muestras de mezcla bituminosa en caliente antes del envejecimiento (izquierda) y después de 2000 horas de exposición a envejecimiento (derecha) [52].

1.3. Parámetros de evaluación y efectos del envejecimiento

La mayoría de los parámetros de evaluación del envejecimiento consisten en medidas de consistencia del betún, tales como penetración, viscosidad y ductilidad.

La composición de los betunes viene dada en función de las cantidades relativas de cuatro fracciones denominadas SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos) (Figura 2.5). Los efectos de la funcionalidad de estas cuatro fracciones sobre las propiedades físicas del betún se han descrito de la siguiente forma [54]:

- Los asfaltenos funcionan como espesantes.
- Los saturados y los aromáticos dan fluidez al betún.
- Las resinas proporcionan ductilidad a los betunes y,
- Los asfaltenos, junto con los saturados y aromáticos, son los responsables de las condiciones de flujo en el betún.

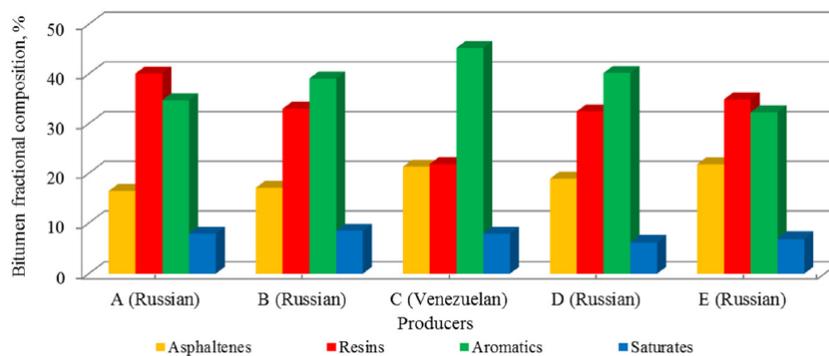


Figura 2.5. Separación en fracciones SARA para algunos betunes [55].

Los cambios en las fracciones SARA ponen de manifiesto las alteraciones químicas que se producen en los betunes. Existen varios métodos que permiten (de manera físico-química o mecánica), a partir de la composición del betún, obtener algunos índices que indican su

comportamiento. Por ejemplo, el índice de durabilidad o *Gaestel Index*, I_c [56] es una expresión del potencial del betún a envejecer:

$$I_c = \frac{\text{Asfaltenos} + \text{Saturados}}{\text{Aromáticos} + \text{Resinas}} \quad (2.2)$$

A medida que se envejece el ligante, el índice de durabilidad aumenta [57]. Un valor límite del índice de durabilidad de 60 indica un ligante muy endurecido al final de su vida en servicio [58]. Sin embargo, el índice de durabilidad no es un instrumento usual para la interpretación del grado de envejecimiento. Normalmente, para analizar el grado de envejecimiento de los ligantes se recurre al estudio de sus propiedades reológicas.

Para las mezclas asfálticas, Pauls y Welborn [59] usaron la resistencia a compresión de las mezclas degradadas como parámetro de evaluación. Kemp y Predoehl [8] usaron el módulo resiliente de éstas, al igual que Rondón y Reyes [19], los cuales también estudiaron la evolución de la deformación permanente para evaluar la rigidez y la resistencia a fatiga bajo las condiciones ambientales. Kim, *et al.* [4] establecieron la relación de módulos y el punto de fragilidad Fraass como variables para valorar el envejecimiento, considerando éstos como buenos indicadores para medir la tasa de envejecimiento de mezclas asfálticas y betunes, respectivamente.

Arega, *et al.* [23] se preguntaron si la resistencia a la fisuración por fatiga de las diferentes mezclas (que habitualmente se determina sólo después de envejecimiento a corto plazo) cambia significativamente después del envejecimiento a largo plazo. De esta forma, compararon la resistencia a la fisuración por fatiga y la rigidez de morteros asfálticos antes y después de ser sometidos a envejecimiento a largo plazo. De su estudio, se observa que al aumentar el porcentaje de betún, la mezcla posee menor cantidad de betún efectivo, lo cual se traduce en un aumento de la rigidez y un comportamiento frente a la fisuración por fatiga potencialmente diferente [60]. Por último, concluyen que el orden de magnitud de la resistencia a la fisuración por fatiga de las diferentes combinaciones ligante-aditivo no cambió significativamente después del envejecimiento a largo plazo. La Figura 2.6 muestra que el ranking de la fisuración por fatiga de las muestras después de ser sometidas a envejecimiento a corto plazo correlaciona bien con el de aquellas después del envejecimiento a largo plazo. Esto pone de manifiesto que las probetas envejecidas a corto plazo pueden ser utilizadas para evaluar la resistencia a la fisuración por fatiga de las mezclas, aunque estos autores solo lo recomiendan en caso de no tener recursos suficientes para estudiar el largo plazo.

Como revelan Kane, *et al.* [61], el fenómeno del envejecimiento influye en la resistencia al deslizamiento. Estos demostraron que el fenómeno del envejecimiento, sólo debido al efecto del medio ambiente, no se puede ignorar a la hora de predecir la evolución de la resistencia al deslizamiento.

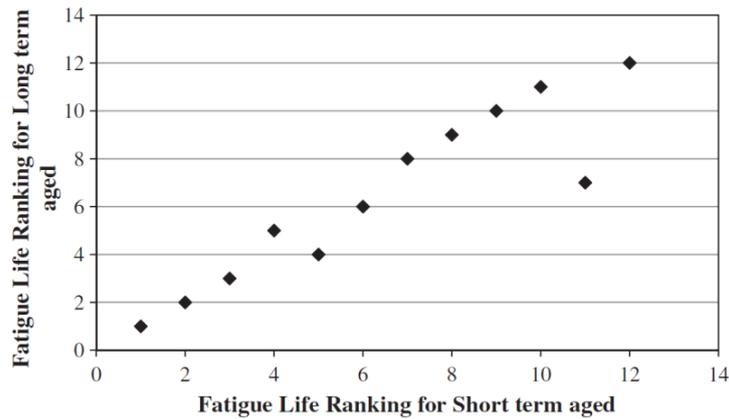


Figura 2.6. Ranking de la vida a fatiga de las muestras antes y después de ser sometidas a envejecimiento a largo plazo [23].

Para evaluar el efecto del envejecimiento sobre las características de la superficie del pavimento, el procedimiento de muestreo clásico no es adecuado, ya que las muestras se toman a menudo a partir de una capa de varios centímetros [62]. El betún recuperado de tales muestras no representa el material de la superficie expuesta a las condiciones ambientales: el sol, la lluvia y el aire. Es por ello, por lo que estos autores presentaron un nuevo protocolo para caracterizar la evolución química del betún situado en la superficie de las mezclas asfálticas.

Después de la validación del protocolo expuesto por estos autores, éste se utilizó para la caracterización del envejecimiento de la superficie, proporcionando una mejor comprensión de la influencia del envejecimiento sobre características de la superficie del pavimento, así como de la resistencia al deslizamiento.

1.4. Procedimientos de envejecimiento

Los métodos de envejecimiento de los materiales bituminosos pueden ser divididos en dos categorías: ensayos realizados en betunes y ensayos realizados en mezclas bituminosas.

El envejecimiento se lleva a cabo mediante calentamiento (manteniendo la muestra en estufa a una temperatura elevada), oxidación (la presencia de oxígeno a una determinada presión acelera las reacciones de oxidación y simula el envejecimiento a largo plazo) o tratamiento con rayos ultravioletas y/o infrarrojos (para acelerar las reacciones de tipo foto-químico). Los ensayos más habitualmente empleados se basan en envejecer una película muy fina del ligante. También se procede al envejecimiento de muestras de cierto espesor depositadas en cápsulas o recipientes abiertos, o al envejecimiento del ligante en la mezcla una vez se ha llevado a cabo la envuelta de los áridos. En este último caso, puede hacerse con la mezcla compactada y sin compactar.

En gran parte de los casos de envejecimiento en laboratorio realizados en betunes se utilizan hornos de envejecimiento de película delgada para envejecer el betún de forma acelerada (por ejemplo, *Thin Film Oven Test* (TFOT) y *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT)). Estos ensayos intentan estimar la resistencia de los betunes al fenómeno de oxidación que tiene lugar durante el proceso de fabricación y extendido de la mezcla, en el que el betún está en contacto con el aire a elevadas temperaturas (envejecimiento a corto plazo). Para incluir el endurecimiento a largo plazo, que se produce durante la vida útil del betún, el procedimiento *Thin Film Oven Ageing* es habitualmente combinado con el procedimiento *Pressure Oxidative Ageing* (por ejemplo, *Pressure Ageing Vessel* (PAV)). En la Tabla 2.1 se incluyen los diferentes procedimientos de envejecimiento de betunes [2].

Además del envejecimiento en laboratorio de los betunes, también existe una serie de métodos para envejecer artificialmente las mezclas bituminosas, los cuales han sido definidos a lo largo de la literatura. El procedimiento básico consiste en envejecer de forma acelerada la mezcla y luego evaluar el efecto del envejecimiento sobre los parámetros clave de la mezcla (por ejemplo, la rigidez o la resistencia). Una lista de los ensayos de envejecimiento de mezclas asfálticas se presenta en la Tabla 2.2.

2. El daño por humedad en mezclas asfálticas

La humedad ha sido reconocida desde hace mucho tiempo por contribuir seriamente a la degradación prematura de los pavimentos asfálticos [3, 52]. El daño asociado a la misma se manifiesta, en primer lugar, por el hecho de que se produce una reducción de la resistencia en la mezcla bituminosa, la cual puede contribuir al desarrollo de diversas formas de deterioro del firme, como el agrietamiento y la formación de roderas [3, 102], reduciendo así la vida del firme [103].

Se han llevado a cabo muchos estudios para obtener, describir y medir la susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas. La mayoría de ellos realizan una medida comparativa del daño por humedad, ya sea a través de la observación visual de los datos de campo o laboratorio, o por medio de ensayos mecánicos, que permiten obtener un parámetro, índice de daño por humedad, basado en valores de trabajo de adhesión [104], ecuación 2.3.

$$IDH = \frac{W_{AS}^{seco}}{|W_{AS}^{húmedo}|} \quad (2.3)$$

donde W_{AS}^{seco} es el trabajo de adhesión entre el betún (subíndice A) y el árido (subíndice S) y $W_{AS}^{húmedo}$ es el trabajo de adhesión entre el ligante y el árido cuando el agua está presente en su

Tabla 2.1. Métodos de envejecimiento de betunes [2].

Método de ensayo	Temperatura (°C)	Duración	Tamaño de la muestra	Espesor de la película	Otro	Referencias
<i>Thin film oven test (TFOT)</i>	163	5 h	50 g	3,2 mm	-	[63, 64, 65]
<i>Modified thin film oven test (MTFOT)</i>	163	24 h	-	100 µm	-	[66]
<i>Rolling thin film oven test (RTFOT)</i>	163	75 m	35 g	1,25 mm	Air flow - 4000 ml/min	[67, 68, 69, 70]
<i>Extended rolling thin film oven test (ERTFOT)</i>	163	8 h	35 g	1,25 mm	Air flow - 4000 ml/min	[66]
<i>Nitrogen rolling thin film oven test (NRTFOT)</i>	163	75 m	35 g	1,25 mm	N ₂ flow - 4000 ml/min	[71]
<i>Rotating Flask test (RFT)</i>	165	150 m	100 g	-	Flask rotation - 20 rpm	[72, 73]
<i>Shell microfilm test</i>	107	2 h	-	5 µm	-	[74]
<i>Modified Shell microfilm test</i>	99	24 h	-	20 µm	-	[67]
<i>Modified Shell microfilm test</i>	107	2 h	-	15 µm	-	[75, 76]
<i>Rolling microfilm oven test (RMFOT)</i>	99	24 h	0,5 g	20 µm	Disolvente benceno	[20]
<i>Modified RMFOT</i>	99	48 h	0,5 g	20 µm	1,04 m Φ apertura	[77]
<i>Tilt-oven durability test (TODT)</i>	113	168 h	35 g	1,25 mm	-	[8]
<i>Alternative TODT</i>	115	100 h	35 g	1,25 mm	-	[78]
<i>Thin film accelerated aging test (TFAAT)</i>	130 o 113	24 o 72 h	4 g	160 µm	3 mm Φ apertura	[79]
<i>Modified rolling thin film oven test (RTFOTM)</i>	163	75 m	35 g	1,25 mm	Varillas de acero	[80]
<i>Iowa durability test (IDT)</i>	65	1.000 h	Residuo TFOT - 50 g	3,2 mm	2,07 MPa - oxígeno puro	[81]
<i>Pressure oxidation bomb (POB)</i>	65	96 h	Residuo ERTFOT	30 µm	2,07 MPa - oxígeno puro	[66]
<i>Accelerated ageing test device/Rotating cylinder ageing test (RCAT)</i>	70-110	144 h	500 g	2 mm	4-5 l/h - oxígeno puro	[82, 83]
<i>Pressure ageing vessel (PAV)</i>	90-110	20 h	Residuo RTFOT o RFOT - 50 g	3,2 mm	2,07 MPa - aire	[32]
<i>High pressure ageing test (HIPAT)</i>	85	65 h	Residuo RTFOT - 50 g	3,2 mm	2,07 MPa - aire	[84]

Tabla 2.2. Métodos de envejecimiento en mezclas asfálticas (modificado a partir de Airey [2]).

Método de ensayo	Simulación	Temperatura (°C)	Duración	Material / Tamaño	Otro	Referencias
Envejecimiento en planta	-	135	8, 16, 24, 36 h	Material suelto	-	[85]
<i>Long-term ageing</i>	Largo plazo	60	2 días	Probetas compactadas	-	[85]
<i>Long-term ageing</i>	Largo plazo	107	3 días	Probetas compactadas	-	[85]
<i>SHRP short-term oven ageing (STOA)</i>	Largo plazo	60	5 a 10 días	Probetas compactadas	0,7 MPa - aire	[85]
<i>SHRP long-term oven ageing (LTOA)</i>	Corto plazo	135	4 h	Material suelto	-	[86, 87]
	Largo plazo	85	5 días	Probetas compactadas	-	[86, 87]
<i>Bitutest protocol</i>	Corto plazo	135	2 h	Material suelto	-	[88]
	Largo plazo	85	5 días	Probetas compactadas	-	[88]
Mezcla de arena de Ottawa	-	163	Varios periodos	Cilindros 50x50 mm ²	-	[59]
Plancher, <i>et al.</i>	-	150	5 h	Diámetro de 25 x 40 mm ²	-	[89]
<i>Ottawa sand mixtures</i>	-	60	1200 h	-	-	[8]
BRRC	Corto plazo	135	1,5 h	Material suelto 3cm en homo	-	[90]
	Largo plazo	60	14 días	Material suelto 3cm en homo	-	[90]
EMPA	Corto plazo	135	3 h	Probetas compactadas	-	[27]
	Largo plazo	110/120	16 h	Probetas compactadas	-	[27]
Hugo y Kennedy	-	100	4 o 7 días	-	Humedad relativa 80%	[91]
Kumar y Goetz	-	60	1, 2, 4, 6, 10 días	Probetas compactadas	Aire a 0,5 mm de agua	[92]
<i>Oregon mixtures</i>	-	60	0, 1, 2, 3, 5 días	Probetas compactadas	0,7 MPa - aire	[4]
<i>SHRP low pressure oxidation (LPO)</i>	Largo plazo	60 o 85	5 días	Probetas compactadas	Oxígeno - 1,9 l/min	[86]
Khalid y Walsh	-	60	Hasta 25 días	Probetas compactadas	Aire - 3 l/min	[93]
<i>PAV mixtures</i>	-	100	72 h	Probetas compactadas	2,07 MPa - aire	[94]
Hachiya, <i>et al.</i>	Corto plazo	70	8 h	Vigas	-	[95]
	Largo plazo	60	20 días	Vigas	-	[95]
Hveem, <i>et al.</i>	Largo plazo	60	1000 h	Mezclas de arena semi compactadas	-	[67]
LCPC	Corto plazo	135	4 h	Material suelto	-	[96]
	Largo plazo	100	24 h	Material suelto	-	[96]
<i>Liverpool University</i>	Largo plazo	60	21 días	Material compactado	Aire	[27]
Mugler	Largo plazo	163	5 h	Material compactado	Diferente cantidad de huecos	[97]
<i>Nottingham University SATS</i>	Largo plazo	85	65 h	Material compactado	Saturado - 2,1MPa	[98]
RILEM TG5	Corto plazo	135	4 h	Material suelto	-	[99]
	Largo plazo	85	9 días	Material suelto	-	[99]
Shell	Corto plazo	Mezclado	2 h	Material suelto	-	[27]
	Largo plazo	80	7 días	Material suelto	-	[27]
Tia, <i>et al.</i>	Largo plazo	60	90 días	Material compactado	Con y sin UV	[100]
TRL	Largo plazo	60	48 h	Material compactado	-	[27]
Van Gooswilligen, <i>et al.</i>	Largo plazo	160	16 h	Material suelto	En una lata sellada	[101]
VTI	Corto plazo	Ambiente	4,5 semanas	Material compactado/giratoria	-	-
	Largo plazo	60	7 días	Material compactado/giratoria	-	-

interfase. Interfases entre materiales con altos valores de W_{AS}^{seco} están relacionadas con mezclas resistentes al daño por humedad.

El daño por humedad se manifiesta generalmente por una pérdida de cohesión en la mezcla y/o por la pérdida de adhesión entre el betún y los áridos [2]. Una condición necesaria para el buen comportamiento de las mezclas asfálticas en carreteras, así como otros productos bituminosos, es que el ligante mantenga una buena adhesividad con el árido.

2.1. Adhesividad

La adhesividad se define como la capacidad de un ligante para permanecer fijado a un árido, recubriéndolo sin peligro de desplazamiento aún en presencia de agua, siendo la adhesión la fuerza por unidad de superficie que une las moléculas del ligante a las del árido. Dentro del término adhesividad se agrupan dos propiedades distintas (Figura 2.7): la adhesividad activa, definida como la capacidad de un ligante para mojar el árido, y la adhesividad pasiva, que se define como la resistencia del betún a ser desplazado de la superficie del árido por el agua [105].

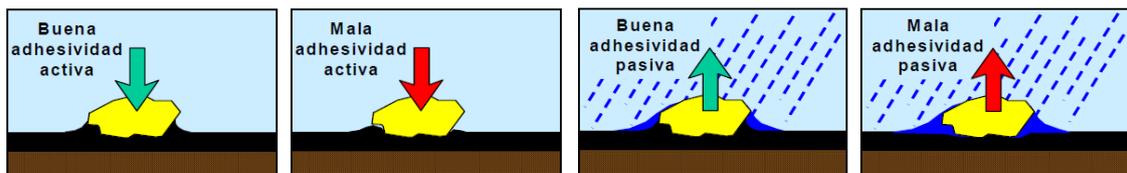


Figura 2.7. Funcionamiento del mecanismo de adhesividad [106].

Se sabe que la adhesión árido-ligante mejora con un aumento de la rugosidad de la superficie total, Figura 2.8, la cual maximizará la conexión mecánica entre el ligante y los áridos (Figura 2.8b). Este fenómeno depende de la capacidad del ligante a entrar en contacto con la superficie del árido. Si el ligante no es capaz de extenderse correctamente por la superficie del árido, no se beneficiará del incremento de adherencia en la unión (Figura 2.8c).

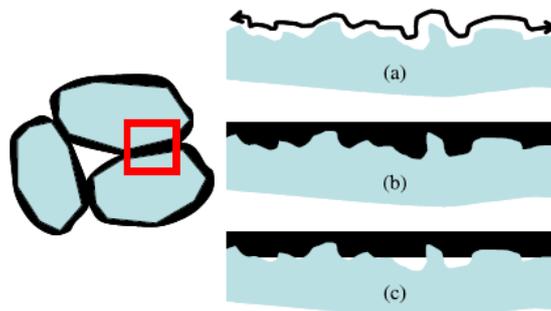


Figura 2.8. Características de la superficie de la interfaz árido-mástico: (a) superficie del árido rugosa (b) buen mojado por el mástico y (c) mal mojado por el mástico [107].

La tendencia de un líquido para cubrir una determinada superficie sólida en lugar de formar una gota compacta se denomina mojabilidad [108], la cual se puede cuantificar a partir del ángulo de contacto (θ) (Figura 2.9). Un ángulo de contacto correspondiente a cero indica un mojado perfecto. Si $\theta > 90^\circ$, el líquido no moja completamente la superficie del material (Figura 2.9a) y, consecuentemente, tendrá una pobre adherencia. Si $\theta < 90^\circ$, el líquido tiene una buena capacidad de mojado, condición que se refleja en una buena adherencia (Figura 2.9b). En los betunes normalmente el ángulo de contacto está comprendido entre 90 y 180° , lo que indica que el agua tiende a desplazar al ligante. Que el ligante moje o no al árido depende del sistema de fuerzas que actúa en su superficie de contacto (tensión superficial del ligante, tensión superficial del sólido y tensión superficial en la zona de contacto).

La adherencia entre el árido y el ligante puede ser medida indirectamente con técnicas tales como un ensayo de tracción [109] o a partir de su viscosidad. En las especificaciones sobre ligantes suele indicarse la viscosidad máxima que han de tener los productos bituminosos para asegurar una buena envuelta.

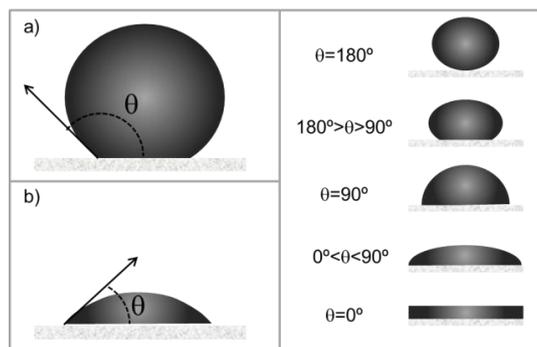


Figura 2.9. Ángulos de contacto entre árido-ligante. a) Líquido con baja mojabilidad y b) líquido con alta mojabilidad (modificado a partir de Moraes, *et al.* [110]).

Las fuerzas y tensiones de tipo químico también influyen y modifican las condiciones de equilibrio. El betún asfáltico está constituido por grandes moléculas entre las que se encuentran grupos ácidos que le dan un cierto carácter negativo. Si el árido es un material calcáreo, en presencia de la humedad natural expone iones calcio con características electropositivas (Figura 2.10a). Estos iones compiten en la unión con el agua y el ligante. Es decir, los áridos básicos son menos hidrófilos, presentando cierta atracción por los ácidos libres de los betunes y mejor adhesividad. A su vez los áridos silíceos o ácidos tienen una gran afinidad por el agua, lo que dificulta su adhesividad a los ligantes bituminosos (Figura 2.10b).

2.2. Patrones de fallo

Kiggundu y Roberts [111] definieron el daño por humedad como el progresivo deterioro funcional de la mezcla que forma el pavimento debido a la pérdida de la unión adhesiva entre el

ligante y el árido, y/o la pérdida de resistencia cohesiva en el ligante, principalmente por efecto de la acción del agua. El daño por humedad normalmente tiene que ver con una acción combinada de daño mecánico e infiltración de agua, donde el debilitamiento de la película de ligante promoverá un patrón de fallo cohesivo y el debilitamiento de la unión árido-ligante promoverá un marcado patrón de fallo adhesivo.

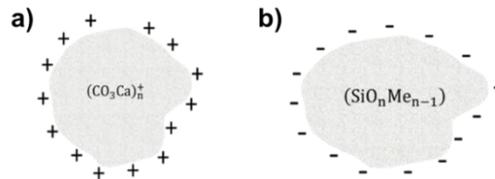


Figura 2.10. Superficie mineral de un material ionizado por la presencia de humedad: a) material calcáreo y b) material silíceo.

El fallo adhesivo (Figura 2.11a) ocurre dentro de la unión árido-ligante. Cuando el agua penetra en la interfase entre el árido y el ligante, se reduce el contacto entre los dos materiales y causa un fallo de adherencia [112, 113]. El fallo cohesivo (Figura 2.11b) tiene lugar dentro del ligante [114]; la fuerza de cohesión del ligante se reduce (los enlaces entre las moléculas de ligante se rompen), lo que da lugar a su dispersión o pérdida de concentración, causando una reducción en la rigidez de la mezcla. Existe la posibilidad de que el daño por humedad en las mezclas asfálticas se deba a la combinación de ambos modos de fallo, fallo adhesivo y fallo cohesivo [107, 109]. Este modo de fallo se denomina fallo mixto (Figura 2.11c).

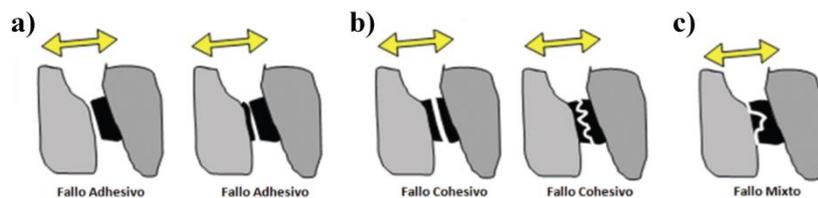


Figura 2.11. a) Fallo adhesivo, b) fallo cohesivo y c) fallo mixto [115].

2.3. Mecanismos de daño por humedad

Los mecanismos de daño por humedad en mezclas asfálticas se inician con los modos de transporte en los que el agua, en estado líquido o vapor, alcanza el interior de la estructura del material y culminan con diversas manifestaciones de este deterioro, siendo sólo un problema si el agua es capaz de penetrar en la mezcla.

Existen tres modos principales de transporte de agua en el interior de las mezclas asfálticas [116, 117, 118]:

- **Permeabilidad:** infiltración de agua líquida desde la superficie del pavimento asfáltico hacia el interior de la mezcla a través sus poros. El agua debido a la lluvia puede entrar en

la mezcla provocando un flujo de agua a través de los macro-poros conectados, Figura 2.12a.

- **Ascensión capilar:** mecanismo por el cual se produce el movimiento ascendente del agua líquida proveniente de la superficie inferior de la mezcla. Este mecanismo permite que la humedad que pueda existir en los macroporos de la mezcla (Figura 2.12b) pueda ser transportada a través de los “capilares” formados por poros interconectados.
- **Difusión** de agua (en estado líquido y/o vapor) a través de los materiales que componen la mezcla. La humedad puede estar presente dentro de los áridos, incluso antes de la construcción del pavimento [119, 120, 121, 122], Figura 2.13c.

Además de la lluvia, el flujo rápido de agua a través de los macro-poros conectados de la mezcla asfáltica puede aparecer localmente en un pavimento saturado cuando se somete a la carga de tráfico, fenómeno denominado como "*lavado hidráulico*" o "*pumping action*" [123, 124].

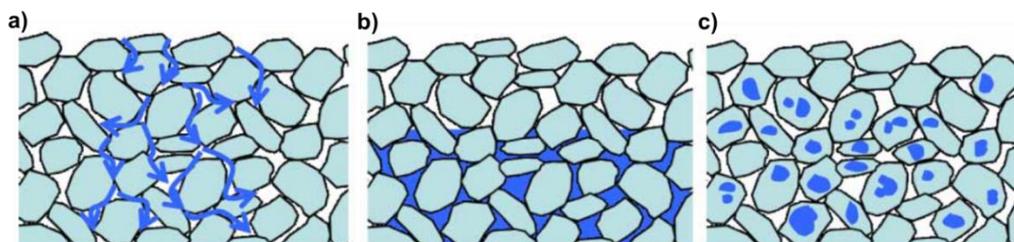


Figura 2.12. Modos de penetración del agua en las mezclas asfálticas: a) permeabilidad, b) ascensión capilar y c) difusión [107].

En el firme, existen diversos mecanismos que, actuando individual o conjuntamente, pueden producir la desenvuelta entre el árido y el betún. La Tabla 2.3 muestra los principales mecanismos de daño por humedad considerados hasta la actualidad [125, 126].

Kringos [140] dividió los procesos de daño en procesos físicos y mecánicos [142]. Los procesos físicos son la difusión molecular del agua, lo que provoca un debilitamiento del mástico y de la unión árido-ligante, y un "lavado" o proceso de erosión del mástico debido a las altas presiones de agua o al flujo rápido de agua (Figura 2.13a). El proceso de daño mecánico se produce por la aparición de campos de presión de agua intensos causados por las cargas de tráfico (*pumping action*) (Figura 2.13b). Estos procesos se encuentran acoplados y es su efecto combinado el responsable del daño inducido por la humedad (Figura 2.13c).

Mehrara y Khodaii [139] dividieron los mecanismos de daño por humedad en micro- y macro-mecanismos. Los micro-mecanismos engloban todas aquellas teorías que estudian la adhesión entre el árido y el ligante, la cohesión del ligante y ambos modos de fallo (por adhesión o por cohesión) a escala molecular, mientras que las teorías incluidas en los macro-mecanismos los estudian a macro-escala.

Tabla 2.3. Mecanismos de daño por humedad.

Proceso	Mecanismo	Referencias
Desplazamiento	El agua con menor energía superficial y mayor momento dipolar que el betún lo desplaza de la superficie del árido.	[127, 128, 129, 130]
Desprendimiento	El agua con menor energía superficial y mayor momento dipolar hace que el betún se separe de la superficie del árido.	[127, 129, 130]
Emulsificación espontánea	La formación de la emulsión, debido a la presencia de agentes como revestimientos de arcilla, debilita la unión en la interfase.	[127, 129, 130]
Presión intersticial	La alta presión de poros en condiciones no drenadas hace una rotura en la película betún permitiendo que el agua entre en el interfaz.	[111, 123, 131, 132]
Desprendimiento químico	La interacción química y electrostática entre el agua y algunos áridos favorece la eliminación de betún entre ellos.	[133, 134, 135]
Actividad microbiana	Los procesos metabólicos microbianos en la interfaz dan subproductos que rompen la adhesión en la interfase.	[136, 137]
Ósmosis	El gradiente de concentración a través de la película betún hace que el agua sea transportada a la interfaz.	[138]
Rotura de la película	Rotura de la película de betún por los bordes del árido.	[116, 126]
Cohesión	Pérdida de la cohesión molecular en el ligante.	[126]
Dispersión del mástico	Pérdida de cohesión en el ligante o mástico debido a largos periodos de difusión y pérdida de material por efecto de un flujo de agua.	[139]
Adhesión	Pérdida de adhesión árido-ligante.	[126]
Efectos ambientales	Incidencia de las condiciones ambientales. Cambios bruscos de clima.	[126]
pH del agua de contacto	Cambios de pH en la interfaz árido-ligante.	[126]
Lavado hidráulico	Acción de los neumáticos en la superficie saturada.	[126]
Desorción del mástico	Eliminación de las capas externas de mástico de la superficie de los áridos debido a la presencia de flujos de agua.	[116, 140, 141]

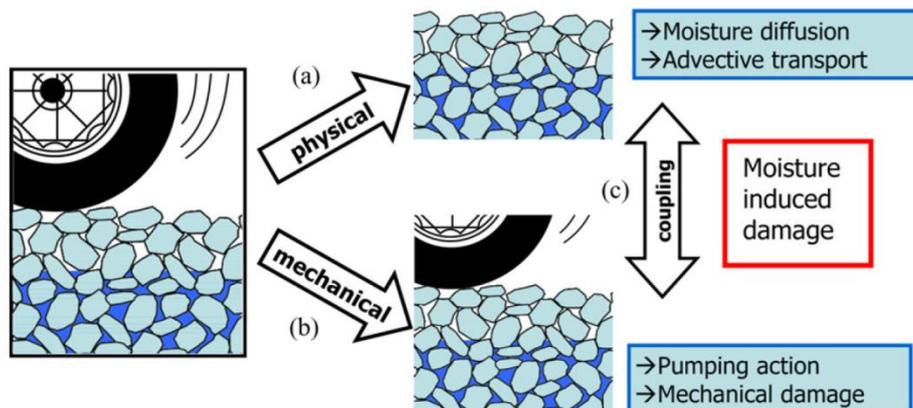


Figura 2.13. Separación del daño por humedad en procesos físicos y mecánicos [107].

Caro, *et al.* [116] definen los mecanismos de daño por humedad siguiendo la corriente de los micro-mecanismos, siendo éstos el desprendimiento, el desplazamiento, la dispersión del mástico, la rotura de la película o microcraks, la eliminación del mástico y la emulsificación espontánea. Mehrara y Khodaii [139] dividen los macro-mecanismos de daño por humedad en el exceso de presión de poros, el lavado hidráulico y la erosión física, también denominado movimiento advectivo. Otros autores como Taylor y Khosla [123], Terrel y Al-Swailmi [143] o Valdés, *et al.* [115] identifican cinco mecanismos de daño por humedad: desprendimiento, desplazamiento, emulsificación espontánea, presión de poros y lavado hidráulico [144, 145, 146]. Sin embargo, autores como Hamzah, *et al.* [147] añaden el efecto de las condiciones ambientales. Kiggundu y Roberts [111], Little y Jones [148] y García [149] incluyen, además de los anteriores, el pH del agua.

El mecanismo de desprendimiento consiste en la separación microscópica de la película de ligante de la superficie del árido por una delgada capa de agua, sin la ruptura de la película de betún. Sin tener en cuenta la humedad que está presente en los áridos, y suponiendo una película continua de ligante, la humedad sólo puede llegar a la interfaz árido-ligante moviéndose a través de la película de ligante. Debido a que el ligante tiene una porosidad insignificante, el único proceso físico que explica la infiltración de agua en el ligante es la difusión molecular [138, 150, 151, 152]. Dependiendo de los coeficientes de difusión de humedad del ligante y del espesor de la película de ligante, el agua llegará a alcanzar la interfaz árido-ligante. Como la difusión de agua a través de la película de ligante continúa y el gradiente de concentración de humedad disminuye, una cantidad significativa de agua llegará a la interfaz árido-ligante y hará la desunión progresiva del ligante con el árido (Figura 2.14). El desprendimiento se produce cuando la película de ligante, sin haberse roto de forma evidente, es separada de la superficie del árido por una fina capa de agua, implicando una pérdida completa de adhesión.

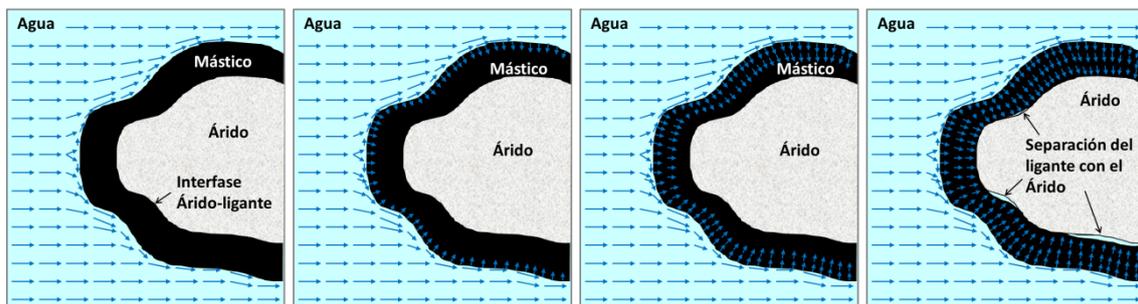


Figura 2.14. Esquema de la pérdida de contenido de mástico debido a la presencia de un flujo de agua.

El mecanismo de desplazamiento se produce cuando el mástico es eliminado de la superficie del árido por el agua. En este caso, el agua libre llega a la superficie del árido a través de una rotura en la capa del ligante. El origen de la rotura puede ser debida a un revestimiento

incompleto de los áridos durante el mezclado, a partículas de polvo en los áridos, a las cargas producidas por el tráfico o a condiciones ambientales como ciclos de hielo-deshielo [111, 112, 148]. La presencia de agua en el firme puede conducir a un flujo rápido de agua a través de los macro-poros de la mezcla asfáltica, el cual produce la pérdida de las partículas que conforman el mástico, fenómeno denominado lavado o erosión del mástico (Figura 2.15). Kringos, *et al.* [107] denominan a este proceso de daño como transporte advectivo. Además, el agua puede infiltrarse en la película de ligante a través de la difusión molecular. El incremento del contenido de agua en el interior del ligante puede causar un debilitamiento local del propio ligante, y puede ayudar al efecto de lavado, causando una pérdida aún mayor de la concentración de mástico en la mezcla bituminosa (Figura 2.16).

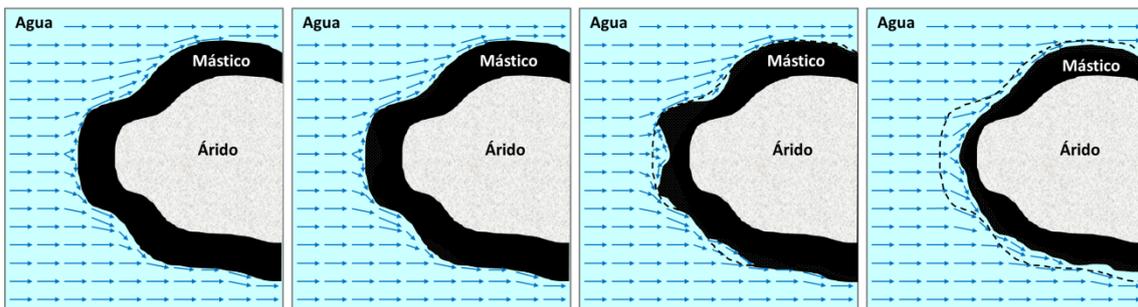


Figura 2.15. Esquema de la pérdida de contenido de mástico debido a la presencia de un flujo de agua.

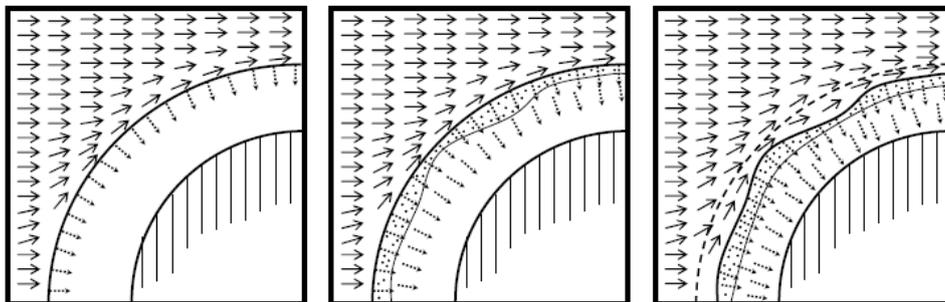


Figura 2.16. Incremento de la pérdida de mástico debido al debilitamiento del ligante, causado por difusión molecular [107].

La emulsificación espontánea se produce cuando se forma una emulsión inversa de gotas de agua en el ligante [114]. Hay dos tipos de emulsiones posibles entre el agua y el ligante. La primera es la típica emulsión asfáltica donde el ligante está disperso en el agua, mientras que la segunda es una emulsión invertida donde el agua está dispersa en el ligante.

El pH del agua de contacto es otro de los mecanismos que afectan a la adherencia entre el árido y el ligante. La estabilización del pH en la interfase árido-ligante puede minimizar la ruptura del enlace, proporcionar enlaces fuertes y duraderos y reducir la pérdida de recubrimiento[148].

El lavado hidráulico o *pumping action* es debido al movimiento de los neumáticos sobre la superficie saturada del firme [103, 116, 153]. Cuando la rueda de un vehículo pesado se mueve sobre la superficie de un firme cuyos macro-poros se encuentran saturados, el agua es presurizada dentro de los espacios vacíos de la capa delante de la carga móvil e inmediatamente aliviada detrás de ella (Figura 2.17a), pudiéndose producir la desenvuelta. Las cargas rápidas debidas al tráfico pueden inducir localmente presiones intersticiales excesivamente altas en el agua atrapada en los huecos de la mezcla (Figura 2.17b), causando el desplazamiento de la película de ligante de la superficie del árido [154]. Este proceso tiene implicaciones para los procesos físicos de daño inducido por humedad. Por ejemplo, las presiones intersticiales intensas crearán localmente un campo de flujo rápido de agua que contribuye al lavado de las partículas del mástico, que a su vez afecta a las características de difusividad del mástico (Figura 2.17c).

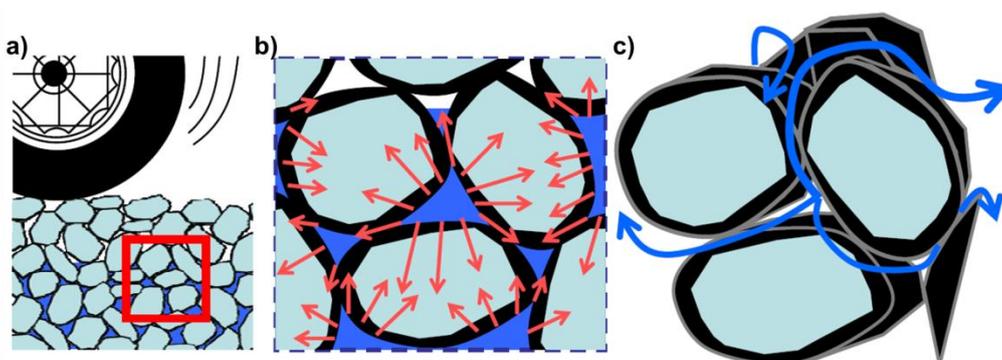


Figura 2.17. Lavado hidráulico o *pumping action* en el firme asfáltico: a) carga debida al tráfico, b) exceso de presión en los poros y c) flujo rápido de agua [140].

Otro mecanismo de daño por humedad es la presión en los poros. Cuando el agua queda atrapada en los huecos de aire de la mezcla, el aumento de la temperatura y las cargas producidas por el tráfico, posibilitan la evaporación del agua que puede generar suficiente presión como para ocasionar la ruptura de la película de ligante [103].

2.4. Factores que influyen en el daño por humedad

Los mecanismos de fallo de los pavimentos debidos al daño por humedad dependen de los efectos combinados de las propiedades del material utilizado, los parámetros de diseño de la mezcla, el nivel de tráfico al que se ve sometida y los factores ambientales. La Tabla 2.4 incluye una lista de los factores que pueden influir en el daño por humedad [120, 155].

Los factores que influyen en el comportamiento de las mezclas frente al daño por humedad se pueden dividir en factores internos y factores externos.

Tabla 2.4. Factores que influyen en el daño por humedad.

Árido	- Composición	- Características físicas
	- Grado de acidez o pH	- Angularidad
	- Química de la superficie	- Rugosidad de la superficie
	- Tipos de minerales	- Superficie específica
	- Procedencia de los áridos	- Granulometría
	- Recubrimientos de polvo y barro	- Porosidad
Ligante	- Contenido de humedad	- Permeabilidad
	- Resistencia a la degradación	
	- Grado o dureza	
Diseño de la mezcla	- Composición química	
	- Fuente del crudo y proceso de refinado	
	- Porcentaje de huecos	
Producción de la mezcla	- Contenido de ligante	
	- Espesor de la película de ligante	
	- Propiedades de aditivos <i>antistripping</i>	
	- Porcentaje de recubrimiento del árido y calidad del árido que pasa por el tamiz nº 200	
Construcción de la mezcla	- Temperatura en planta	
	- Exceso de contenido de humedad en el árido	
	- Presencia de arcilla	
	- Alto contenido de huecos en la construcción - Compactación	
Condiciones ambientales	- Permeabilidad y drenaje	
	- Segregación de la mezcla	
	- Cambio del diseño de la mezcla a su producción en campo (variabilidad en campo)	
	- Temperatura	
	- Zonas de alta precipitación / periodos intensos de precipitación	
	- Ciclos de hielo-deshielo	
Tráfico	- Vapor de humedad	
	- Humedad (alta humedad relativa)	
	- Edad del pavimento	
	- Presencia de iones en el agua (incluyendo el efecto del pH del agua)	
Otros factores	- Zonas desérticas (<i>stripping</i> debido al vapor)	
	- Intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDp)	
	- Drenaje superficial	
	- Drenaje sub-superficial	
	- Estrategias de rehabilitación	

Factores internos

Los factores internos son todos aquellos relacionados con las propiedades de los materiales que forman la mezcla bituminosa y con el diseño de la misma.

- **Áridos:** las propiedades físicas de los áridos, como son la angularidad, porosidad, forma y textura, son de gran importancia (Figura 2.18). La adhesión del árido con el ligante será mayor en áridos con forma angular y textura áspera que en áridos con forma redondeada y textura lisa [150]. En algunos casos, los áridos con forma muy angular son difíciles de recubrir uniformemente. Los bordes del árido pueden llegar a romper la película de betún haciendo a la mezcla más susceptible al daño por humedad [156]. Una buena capacidad de absorción del árido, así como una alta porosidad del mismo, permiten la penetración del ligante por los poros mejorando la unión árido-ligante. La superficie específica del árido influye en la unión de éste con el ligante; así, cuanto mayor es la superficie específica mejor será la unión árido-ligante. Es muy importante que los áridos se

encuentren limpios y secos, ya que cuando están cubiertos de polvo, la viscosidad del ligante aumenta y al entrar en contacto con agua, la unión árido-ligante se rompe. Por último, es importante tanto la composición mineralógica del árido (en términos de su naturaleza hidrófila e hidrófoba), así como su afinidad con el ligante [113].



Figura 2.18. Resumen de las propiedades físicas de los áridos y cómo afectan al daño por humedad [125].

- Ligante:** es de amplio conocimiento que el betún es un material impermeable que reacciona muy poco ante la presencia de agentes químicos externos; sin embargo, el agua presenta, como uno de sus componentes químicos esenciales, oxígeno y otros compuestos capaces de generar cambios en las propiedades químicas y físicas del ligante a largo plazo (i.e., oxidación y endurecimiento), en especial, cuando la interconexión árido-ligante es muy delgada. Rondón-Quintana y Moreno-Anselmi [157] demostraron que el ligante asfáltico en presencia con agua modifica su consistencia y aumenta su rigidez (Figura 2.19). Estos autores concluyen que una de las causas que generan la desenvuelta del betún con el árido podría ser el aumento de la rigidez, la cual causa la contracción del ligante sin cambio de volumen (Figura 2.20).

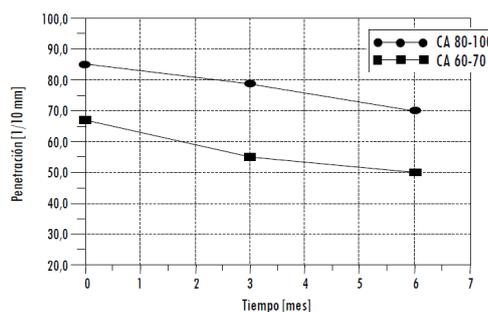


Figura 2.19. Influencia del agua en la magnitud de la penetración para las mezclas CA 80-100 y CA 60-70 [157].

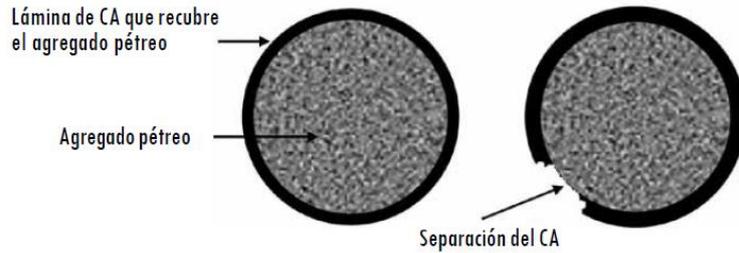


Figura 2.20. Esquema idealizado del proceso de contracción del betón y separación del árido [157].

El espesor de la película de betón tiene también una influencia sobre la susceptibilidad a la humedad de mezclas bituminosas en caliente, afectando a su durabilidad. Películas gruesas, que están asociadas con mezclas flexibles, son conocidas por ser durables [120, 158]. Las películas delgadas, por otro lado, están asociadas con mezclas frágiles que tienden a agrietarse y colapsar excesivamente (fallo adhesivo) [113]. Según Sengoz y Agar [3] los valores óptimos de espesor de la película de ligante se encuentran en el intervalo entre 9,5 y 10,5 μm .

- **Enlace árido-ligante:** la unión entre el árido y el ligante es fundamental en el estudio de sensibilidad al agua de las mezclas asfálticas [159]. La variación existente en la adherencia de distintos tipos de áridos con el ligante en presencia de agua se debe a la reacción química que sucede entre ambos [160], la cual tiene lugar durante el mezclado del ligante con los áridos. Estas reacciones químicas, a largo plazo, pueden llegar a incidir en la durabilidad del firme.
- **Permeabilidad y huecos de aire:** los huecos de aire y el espesor de la película de betón son probablemente los factores más importantes [3, 161]. Ambos parámetros, que están influenciados por el grado de compactación, contenido de ligante y granulometría del árido, controlan el nivel de saturación de agua y drenaje (Figura 2.21). Chen, *et al.* [162] clasificaron el contenido de huecos en las mezclas en tres categorías: el contenido de huecos efectivo, semi-efectivo e impermeable (Figura 2.22). La consideración de efectividad se interpreta como la conectividad de los huecos dentro de la mezcla, lo que permite un acomodamiento de la mezcla frente a los cambios térmicos por efecto del clima y el tráfico, además de la circulación del agua y aire dentro de la misma. Con alto porcentaje de huecos, por encima del 6%, una mezcla dada puede sufrir un considerable grado de daño por humedad. Se exceptúan las mezclas abiertas donde los niveles de huecos son del 15-25%, permitiendo que el agua se mueva [120]. Las investigaciones realizadas sobre mezclas con un porcentaje de huecos menor del 4 a 5% muestran que normalmente los huecos no se encuentran conectados, y por ello, las mezclas son impermeables.

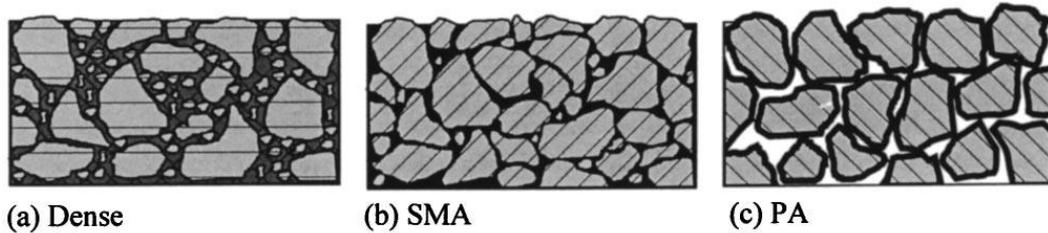


Figura 2.21. Ilustración esquemática de los huecos de aire en tres mezclas distintas [162].

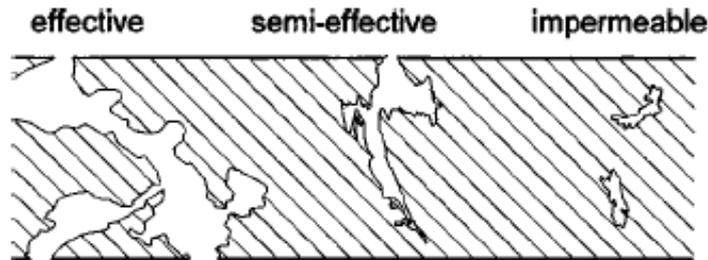


Figura 2.22. Clasificación del contenido de huecos de aire en las mezclas asfálticas [162].

Factores externos

La fabricación de la mezcla, la puesta en obra, el nivel de tráfico y las condiciones ambientales son algunos de los factores externos que influyen en el comportamiento de las mezclas frente a daño por humedad.

- **Fabricación de la mezcla bituminosa:** para que la unión del árido con el ligante sea apta, los áridos han de encontrarse limpios y separados para evitar su contaminación. Un exceso de polvo o arcilla modificaría las propiedades de la mezcla, haciéndola más susceptible al daño por humedad. Además, los áridos deben estar secos para que la adhesión sea la correcta [112]. Para evitar que en caso de lluvia los áridos absorban agua, estos se acopian con una ligera pendiente. Los áridos finos convendría cubrirlos para evitar la pérdida del material [114]. El contenido de ligante durante la fabricación de la mezcla debe ser el adecuado, para evitar su exudación. Además, para impedir que la mezcla se enfríe en exceso, es fundamental su traslado inmediato una vez fabricada en planta [163].
- **Puesta en obra:** un factor fundamental a tener en cuenta en la puesta en obra de la mezcla es la compactación. Una compactación inadecuada provocará que la mezcla sea más susceptible al daño por humedad. Es muy importante el uso de un equipo adecuado al tipo de mezcla para evitar que los áridos se fracturen, ya que los áridos podrían quedar expuestos a las condiciones ambientales. Las juntas longitudinales son un punto crítico en la susceptibilidad al daño por humedad, ya que es ahí donde será más difícil alcanzar la densidad óptima [3, 113, 114].

- **Tráfico:** las condiciones de tráfico, tanto tipo como volumen de tráfico, son variables que influyen significativamente en el daño por humedad. En un firme saturado el agua ejerce presión sobre la mezcla, la cual es aún mayor por efecto del tráfico, aumentando la aparición de daños por efecto del agua [3, 140, 164], Figura 2.17. A medida que el tráfico se hace más pesado, o el volumen de camiones aumenta, la cantidad de desenvuelta se hace mayor [158].
- **Condiciones ambientales:** los mayores daños por humedad suelen ocurrir en las zonas donde hay una considerable cantidad de lluvia y/o nieve. Los ciclos de hielo-deshielo, los ciclos de humedad-sequedad, así como el pH del agua, son algunos de los factores ambientales que provocan daños en las mezclas asfálticas. Los ciclos de hielo-deshielo producen que el agua que se encuentra dentro de los huecos aumente su volumen, apareciendo daños en la mezcla al producirse la descongelación. En cuanto al pH del agua, cuanto mayor es éste, más susceptibles son las mezclas bituminosas al agua. El endurecimiento del ligante por efecto de cambios en la composición química del mismo debido al envejecimiento de la mezcla influye igualmente en el enlace árido-ligante [165].

2.5. Manifestaciones de deterioro causado por el agua

Una vez que el pavimento comienza a degradarse, el progresivo daño físico debido a la humedad, en combinación con las cargas de tráfico, puede conducir a las formas más severas de daño inducido por la humedad, como el agrietamiento, la formación de roderas y el colapso [3, 102, 166], lo cual lleva a la formación de baches, reduciendo así la vida del firme [103].

Según Copeland [167], la acción del agua en las mezclas asfálticas puede conducir a daños como el cracking, la deformación permanente, el *raveling* y fallos localizados (*potholes*). Según Kringos, *et al.* [107], los patrones de fallo que podrían darse en mezclas asfálticas debido a la acción del agua son principalmente el *stripping* y el *rutting*. Además de estos patrones de fallo, Caro, *et al.* [116] añadieron el *shelling* y la abrasión hidráulica (*hydraulic scour*).

Aunque existen diversas manifestaciones de deterioro, la más común es el *stripping*, es decir, el deterioro de la mezcla debido a la pérdida de adhesión entre el ligante y el árido al introducirse el agua (líquida o vapor) en el interior de la mezcla, provocando la separación de la unión entre el árido y el ligante [2, 107, 116, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178]. Algunos autores describen este tipo de manifestación como aquella provocada por el mecanismo de daño por humedad definido anteriormente como desprendimiento (Figura 2.23). El deterioro debido al *stripping* puede deberse a diversas causas tales como un secado de los áridos inadecuado, un mal drenaje o una compactación inadecuada, dando lugar a grietas, roderas y/o exudaciones [149]. Según Valdés, *et al.* [115] el envejecimiento del ligante es otro

factor a considerar como responsable de la aparición de microporos o microfisuras en la película de ligante que recubre los áridos, lo cual permite que el agua penetre en la interfaz árido-ligante.

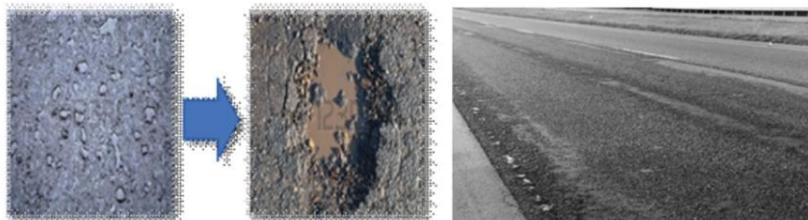


Figura 2.23. Desprendimiento de los áridos por efecto de la acción del agua [179].

El segundo tipo de manifestación más común consiste en el desprendimiento progresivo de los áridos de la superficie de la mezcla causado por el paso de los vehículos sobre el material asfáltico (conocido como *ravelling*) [180]. Las causas de este tipo de manifestación de daño son una mala compactación, un bajo contenido de ligante y/o un alto contenido de finos [149].

El siguiente tipo de manifestación es el conocido como *shelling*. Este se identifica por la pérdida y eliminación de áridos de una capa de sellado u otro tratamiento superficial.

El lavado hidráulico (*hydraulic scour*) es el proceso que ocurre en una superficie saturada por la cual la mezcla es erosionada debido a la acción dinámica de las ruedas, las cuales presurizan el agua del interior de la mezcla, creando flujos de agua en los macroporos de la misma.

2.6. Métodos de acondicionamiento y de ensayo de sensibilidad al agua en mezclas asfálticas

El desarrollo de ensayos para determinar la sensibilidad al agua de las mezclas asfálticas se inició en la década de 1930 [129]. Desde entonces numerosos ensayos se han desarrollado en un intento de identificar la susceptibilidad de las mezclas asfálticas al daño por humedad. Estos ensayos de sensibilidad al agua se suelen dividir generalmente en dos categorías: ensayos realizados en mezclas sueltas y ensayos realizados en mezclas compactadas.

Los métodos de ensayo de la primera categoría generalmente implican la inmersión en agua (o en una solución química) de la mezcla suelta sin compactar, ya sea a temperatura ambiente o una temperatura elevada, durante un período de tiempo especificado, y la evaluación de la separación del betún del árido mediante inspección visual. Una lista de ensayos para analizar el daño por humedad en mezclas sueltas se presenta en la Tabla 2.6.

Los ensayos en mezclas compactadas generalmente usan tanto las muestras preparadas en el laboratorio como muestras de pavimentos existentes. Por lo general, las muestras se

acondicionan en agua para simular las condiciones de servicio y la evaluación del daño por humedad se mide mediante la relación entre la rigidez o fuerza de la mezcla acondicionada y sin acondicionar. Se trata de métodos cuantitativos, en los que la relación entre las muestras acondicionadas y no acondicionadas se utiliza para estimar la susceptibilidad al agua de la mezcla, comparándola con un valor prescrito como umbral. Si el valor obtenido de la realización del ensayo es inferior al valor umbral, la mezcla se clasifica como susceptible al agua. Algunos de estos métodos se enumeran en la Tabla 2.7.

Además de los anteriores, existen otros métodos de ensayo que también consideran el tráfico que pasa a través de la superficie. Algunos de estos métodos se presentan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Ensayos de daño por humedad que consideran la carga de tráfico.

Método de ensayo	Descripción
<i>Immersion wheel tracking test</i>	Mezclas asfálticas sumergidas en agua a 40°C, sometidas a una rueda de 20 kg de carga que se mueve en vaivén a 25 ciclos por minuto.
<i>Hamburg wheel tracking device (HWTD)</i>	Mezclas sumergidas en agua a 50°C sometidas al paso de una rueda de acero.
<i>Environmental conditioning system (ECS)</i>	Someter la mezcla a 3 ciclos a 60°C durante 6 h (vacío parcial y carga repetida continua de 124 kPa) y un ciclo de congelación a -18°C durante 6 h (vacío parcial). Después de cada ciclo, la probeta se acondiciona a 25°C durante 2 h.
<i>Moisture induced stress tester (MIST)</i>	Mantener probeta en agua a temperatura constante generando repetidamente presión en los poros (menos de 3 horas). Se aplica vacío forzando el agua hacia fuera y a través (respectivamente) de una probeta.

En la actualidad, el estudio del daño por humedad ha llevado a la implementación de métodos distintos a los comentados en las Tablas 2.5, 2.6 y 2.7, los cuales pretenden mejorar la cuantificación del daño por humedad en las mezclas asfálticas. Así, investigadores del *Nottingham Transportation Engineering Centre (NTEC)* desarrollaron el ensayo *Saturation Ageing Tensile Stiffness (SATS)* que combina en el acondicionamiento de las probetas el envejecimiento oxidativo junto con el daño producido por el agua. Este ensayo consiste en saturar las probetas antes de introducirlas en agua a una determinada temperatura con alta presión, durante tiempo un determinado. Después del acondicionamiento, se mide el módulo de rigidez y se compara con el módulo de rigidez de las probetas no acondicionadas. La relación obtenida se denomina módulo de rigidez retenido. Los resultados muestran que el ensayo SATS es capaz de diferenciar entre mezclas bituminosas distintas en función de su resistencia al daño por humedad [211, 212].

La ausencia de un método de laboratorio unificado para el estudio del daño por humedad junto con la correlación deficiente entre los distintos métodos de laboratorio y las observaciones in-situ, conlleva el uso de otro tipo de estudios desde un punto de vista más teórico, por ejemplo, la medición de la Energía Libre Superficial del ligante y el árido [116, 213]. La

Tabla 2.6. Ensayos de *stripping* para mezclas sueltas (modificado a partir de [181]).

Ensayo	Volumen de agua	Duración	Tamaño del árido	Tamaño de la muestra	Otros	Referencias
Ensayo de inmersión estática	400 ml (destilada)	16 - 18 h	Tamaño único	100 g	-	[182, 183]
<i>Total Water Immersion Test</i> (Ensayo TWIT)	(destilada)	48 h	14 mm	-	25°C	[184]
Método estático	(destilada)	48 h	-	-	19°C	[185]
Adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos en presencia de agua	-	16 - 18 h	-	-	-	[186]
<i>Film Stripping Test</i>	(destilada)	16 - 18 h	-	-	60°C + sumersión en agua frasco girado a 35 rpm (15 min)	[187]
<i>Dynamic Immersion Test</i>	(destilada)	4 h	-	-	25°C, agitada	[139, 160, 188]
Método de la botella giratoria (<i>Rolling bottle method</i>)	250 ml (ionizada)	75 min	6.3 - 8 mm con 0.1 mm de película de ligante	200 partículas	Varilla de vidrio, botellas giradas a 40 rpm	[185]
<i>Boiling Water Test</i>	500 ml (destilada)	1 - 10 min	Tamaño único o graduado	200 - 300 g	Agua hirviendo	[189]
<i>Texas Boiling Water Test</i>	(destilada)	10 min	-	-	Agua hirviendo, removiendo con varillas de vidrio	[189]
Ensayo de inmersión química (<i>Riedel Weber</i>)	(destilada)	-	Entre 630 µm y 200 µm	0,5 g	Inmersión en soluciones con diferentes concentraciones de Na ₂ CO ₃	[190]
Ensayo de adsorción neta	2 ml	6 h 8 h	Menos de 4,75 mm	50 g	140 ml de solución de tolueno	[165, 191]
Ensayo de adsorción neta modificado	2 ml	6 h 8 h	Graduado menos de 4,75 mm	50 g	140 ml de solución de tolueno	[192]
<i>Ancona stripping test</i> (AST)	200 ml (destilada)	45 min	6 - 10 mm con 3 g de ligante	60 g	Agua hirviendo	[139, 194]
<i>Boiling water stripping test</i>	600 ml (desmineralizada)	10 min	10 - 14 mm con 1,8% de ligante	200 g	Agua hirviendo, ataque químico	[194]
Método de ultrasonido	-	-	20 x 80 mm	2 g de ligante - película de 0.12	ultrasonido	[194, 195]

Tabla 2.7. Ensayos de daño por humedad para mezclas bituminosas compactadas [181].

Ensayo	Acondicionamiento	Evaluación del ensayo	Referencias
<i>Freeze-thaw pedestal test (FTPT)</i>	23°C durante 3 días seguido de -12°C durante 15 h, 23°C durante 45 min y 49°C durante 9 h	Fisuración de la probeta sobre un punto de apoyo	[196]
<i>Immersion-compression test</i>	49°C durante 4 días o 60°C durante 24 h, 25°C durante 4 h	Resistencia a la compresión	[197, 198]
Ensayo de estabilidad Marshall	Tratamiento de vacío en agua @ 0°C a 1°C, 60°C durante 48 h	Estabilidad Marshall	[199]
Ensayo Duriez	18°C durante 7 días	Resistencia a compresión (1 mm/s)	[181, 194, 200, 201]
Procedimiento Lottman	Agua destilada aplicando vacío de 600 mm Hg durante 30 min, presión atmosférica durante 30 min, -18°C durante 15 h, 60°C durante 24 h	Resistencia a la tracción indirecta y rigidez	[202]
<i>Tunncliff and Root test</i>	Agua destilada vacío de 508 mm Hg hasta 55 – 80% de saturación, 60°C durante 24 h, 25°C durante 4 h	Resistencia a la tracción indirecta	[203, 204]
Procedimiento de Lottman modificado	Agua destilada aplicando vacío de 508 mm Hg hasta alcanzar nivel de saturación 55 – 80%, -18°C durante 15 h, 60°C durante 24 h	Módulo dinámico	[118]
Procedimiento Illinois-modified Lottman	Agua aplicando vacío de 13-67 kPa hasta alcanzar nivel de saturación 70-70%, 60°C durante 24 h, 25°C durante 2 h	Resistencia a tracción indirecta y rigidez	[205]
<i>LINK BituTest Water Sensitivity Protocol</i>	Vacío hasta saturación parcial, 60°C durante 6 h, 5°C durante 16 h, 20°C durante 2 h	Static Creep test	[156]
<i>BituTest protocol</i>	Vacío a 510 mm Hg a 20°C durante 30 min, saturación a 60°C durante 6 h, 5°C durante 16 h	Resistencia a tracción indirecta	[206]
<i>Moisture vapor susceptibility (MVS)</i>	60°C durante 75 h	Módulo de rigidez	[181, 194]
Ensayo de Inmersión compresión	Probetas saturadas a 18°C durante 7 días	NAT ITSM testing a 20°C	[88]
Sensibilidad al agua	Probetas saturadas a 40°C durante 68-72 h	Hveem Stability	[207, 208]
<i>Coaxial Shear Test (CAST)</i>	Probetas con confinamiento lateral y sumergidas en agua	Resistencia a compresión	[209]
		Resistencia a la tracción indirecta a 15°C	[209]
		Fatiga	[210]

Energía Superficial Libre del árido se puede medir y, por lo tanto, cuantificar mediante el dispositivo *Universal Sorption Device* (USD), mientras que la energía Superficial Libre del ligante se mide mediante el método de *Wilhelmy Plate* (WP) [148, 214]. Mediante estas pruebas es posible aproximar la energía de la unión árido-ligante, con y sin presencia de agua.

3. La Fisuración de las mezclas asfálticas

El fallo del firme puede producirse por diferentes factores: desprendimientos de material, movimientos de material, deformaciones excesivas y, puede producirse por fisuración. El catálogo de fallos desarrollado por la Federal Highway Administration agrupa los fallos en los firmes en cinco categorías [215]: fisuración, baches y parches, deformación superficial, defectos superficiales y deterioros misceláneos, siendo el fallo por fisuración uno de los más frecuentes en los pavimentos bituminosos.

Las fisuras, en función de su origen se pueden dividir en cinco tipos [216]: las fisuras de fatiga (asociadas con una carga aplicada acumulada superior al límite de resistencia de la carretera), las fisuras de retracción (debidas a un rozamiento de la capa sometida a retracción con la capa soporte superior al de su límite de tracción), fisuras debidas al movimiento del suelo soporte de la carretera (por efecto de la disminución de su capacidad portante, asentamientos diferenciales, etc.), fisuras debidas a defectos en la construcción y fisuras debidas al envejecimiento del ligante y a la exposición a las condiciones ambientales. Normalmente, la aparición de fisuras es debida a la combinación de varios de estos tipos.

Aunque todavía no existe unanimidad respecto a los factores que generan las fisuras [217, 218, 219], investigaciones realizadas al respecto concluyen que el inicio de las fisuras podría ser consecuencia de las tensiones producidas por los gradientes térmicos, mientras que la propagación de las mismas se debería a las tensiones generadas por las cargas del tráfico.

El fenómeno de la fisuración puede dividirse en tres fases: iniciación (donde se inician las microfisuras), propagación (aparecen macrofisuras por la unión de microfisuras) y fractura o fallo total (durante la cual las macrofisuras se propagan) [220].

La fisura puede propagarse según diferentes modos (Figura 2.24), los cuales Irwin [221] clasificó en: modo I o de apertura (la separación de las caras de la fisura se produce de forma paralela), modo II o de deslizamiento (donde una cara se desliza sobre la otra) y modo III o de desgarre (donde una cara se desliza lateralmente respecto a la otra) [222, 223]. El modo de propagación varía según la sollicitación aplicada al firme, aunque generalmente, la fisuración se debe a una combinación de estos tres modos de propagación de fisuras.

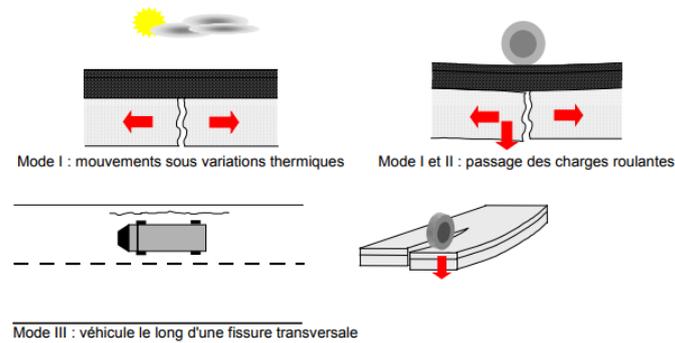


Figura 2.24. Modos de propagación de una fisura [223].

El tráfico consiste en cargas cortas y rápidas seguidas de periodos de reposo [224]. Estas solicitaciones se manifiestan en los firmes en forma de grietas superficiales, las cuales muestran distintas formas y patrones en función de factores como su origen o la estructura del firme, entre otros. Siguiendo la orientación de las fisuras, éstas son generalmente longitudinales o transversales (Figura 2.25), apareciendo rara vez fisuras en diagonal o parabólicas. Su forma suele ser rectilínea, aunque podrían encontrarse fisuras con forma curvada cuando se produce el deslizamiento de las capas del firme. Por otra parte, su ancho depende del fenómeno que las provoca.

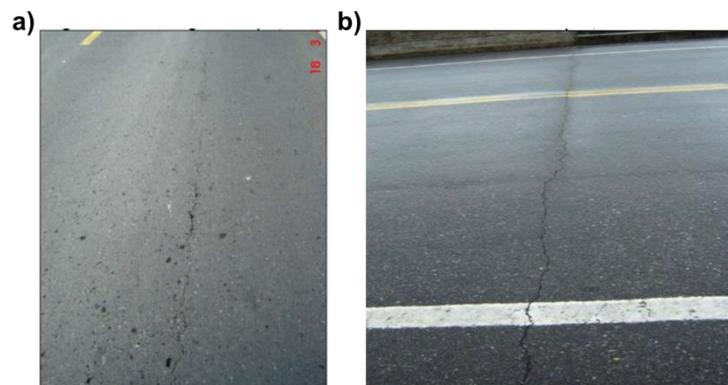


Figura 2.25. a) Fisura longitudinal y b) fisura transversal [225].

En función de su aspecto, las fisuras pueden ser en línea, ramificadas o entrelazadas [216], Figura 2.26a. Por último, según el patrón que forman las fisuras estas pueden dividirse en fisuras aisladas, en bloque o formando polígonos (piel de cocodrilo) [216, 226], Figura 2.26b.

En el pavimento se encuentran diferentes tipologías de fallos por fisuración, los cuales pueden clasificarse siguiendo distintos criterios. La Federal Highway Administration [215] presenta las siguientes tipologías: **fisuración por fatiga** (el fallo ocurre por efecto de la repetición de cargas, produciendo la pérdida paulatina de las características estructurales de las mezclas), **fisuración en bloque** (causada principalmente por los esfuerzos debidos a gradientes térmicos), **fisuración de borde** (atribuida a una base granular débil por una mala compactación

y falta de confinamiento), **fisuración longitudinal** (debida a la mala ejecución de juntas longitudinales), **fisuración por reflexión de las juntas** del pavimento de hormigón y **fisuración transversal** (principalmente debida a las tensiones que se generan por efecto de la disminución de la temperatura).

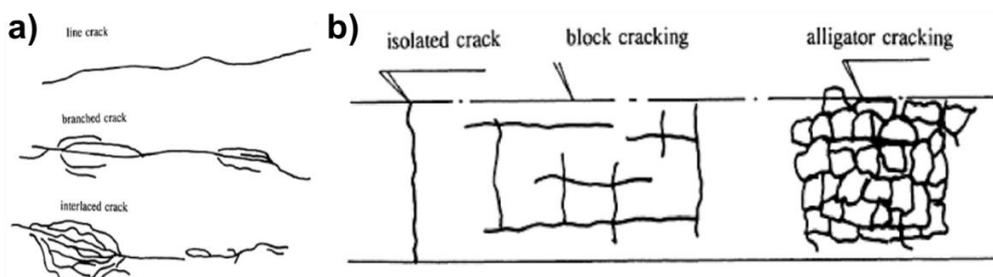


Figura 2.26. a) Diferentes aspectos de las fisuras y b) diferentes patrones de las fisuras [216].

Las fisuras pueden propagarse en dos sentidos, distinguiendo así entre fisuración ascendente o por reflexión de las capas inferiores y fisuración descendente o *top-down cracking*. En la primera de ellas las fisuras progresan desde la capa base hasta la capa superior [227]. El fallo se produce principalmente por efecto del tráfico y/o los gradientes térmicos [228]. En la fisuración descendente las fisuras progresan desde la superficie del pavimento hasta la capa base [229, 230, 231]. En este caso, el fallo se debe entre otros a la aparición de esfuerzos superficiales por efecto de los neumáticos de los vehículos, a tensiones térmicas [232], al envejecimiento [233, 234] y a una deficiente calidad de la mezcla [235].

Existen distintos enfoques para caracterizar el comportamiento de las mezclas asfálticas frente a la fisuración, los cuales se describen brevemente a continuación:

- **Enfoque fenomenológico.** Este enfoque asume que el daño ocurre por la repetición de cargas dinámicas que conducen al fallo por fatiga. El número de repeticiones de carga hasta fallo es igual a la vida a fatiga de la mezcla, y se relaciona con las tensiones o deformaciones en la mezcla [236, 237, 238]. Este enfoque ha sido empleado junto con la ley de Miner [239] para analizar el comportamiento a fatiga de los firmes.
- **Enfoque de la mecánica del daño continuo.** Este enfoque establece que las propiedades de un material se relacionan con parámetros obtenidos a partir de un modelo constitutivo de daño siguiendo ciertos principios mecánicos. Según Schapery [240], para el caso del crecimiento de una fisura, el problema viscoelástico puede reducirse a uno elástico si se usan tensiones físicas y pseudo-deformaciones. Años después, Kim, *et al.* [241], aplicando la teoría de Schapery, desarrollaron un modelo uniaxial visco-elástico de daño continuo, según el cual la respuesta de una mezcla bituminosa sometida a fatiga se debe a: la visco-elasticidad lineal, el daño por fatiga y la recuperación de fatiga.

- **Enfoque de la mecánica de la fractura.** Este enfoque divide el proceso de fisuración en tres etapas: inicio, propagación y fractura de la fisura. Para ello se aplica la ley de Paris sobre el crecimiento de las grietas.
- **Enfoque basado en la energía.** Este enfoque usa el concepto de energía disipada para evaluar el comportamiento a fatiga. Este enfoque se basa en el hecho de que cuando un material se somete a una carga cíclica, el daño se va acumulando. Cuando se aplica una carga al material, ésta induce una deformación, mostrando unos ciclos de histéresis en el diagrama tensión-deformación (Figura 2.27) como consecuencia del retraso existente entre la aplicación de la carga y la reacción del material. El área de estos bucles es lo que se denomina energía disipada durante el ciclo de carga. Estos bucles irán variando a medida que se produzca el daño en la mezcla, pudiendo predecir el comportamiento a fatiga del material [242].

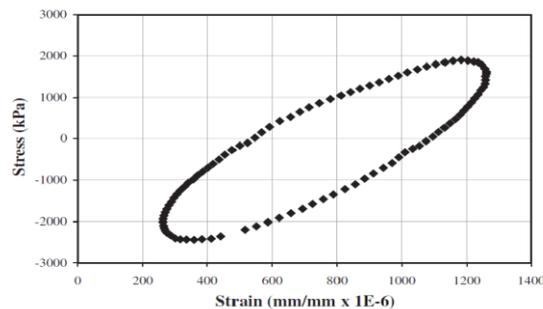


Figura 2.27. Ciclo de histéresis del diagrama tensión-deformación [243].

Teniendo en cuenta los distintos enfoques anteriormente enumerados, a continuación se analizan los mecanismos de fisuración desde dos puntos de vista: el de la respuesta mecánica de la mezcla frente a la aplicación de una carga a velocidad constante y monótonica y el de su respuesta frente a la repetición de cargas cíclicas muy inferiores a las de su resistencia máxima. Al primer enfoque se le denomina fractura de la mezcla y, al segundo enfoque, fatiga de la mezcla.

3.1. Comportamiento a fractura de las mezclas asfálticas

La fisuración de las mezclas puede ser explicada mediante el enfoque de la mecánica de la fractura, según el cual las mezclas bituminosas se encuentran sometidas a cargas cuasi estáticas y monótonicas cuando se les aplica una tracción uniaxial, llegando a fallar por el inicio y la propagación de fisuras.

La mecánica de la fractura fue introducida para estudiar una discontinuidad de los materiales. El concepto de la mecánica de la fractura fue introducido por Inglis (1913), quien

definió el concepto de concentración de tensiones. Más tarde, fue Giffith quien estudió la estabilidad de la fisura y su propagación [244]. Sin embargo, la mecánica de la fractura como se conoce hoy, fue iniciada por Irwin [245] junto con Orowan [246], quienes estudiaron el comportamiento cerca de las caras de la fisura y los criterios y tipos de fractura, respectivamente, lo que permitió introducir los conceptos de factor de intensidad de tensiones, fragilidad y tenacidad [247].

Cuando se habla de fractura es importante definir los conceptos de fragilidad y tenacidad. El fallo de una mezcla será frágil cuando la fisura se propague rápidamente sin que el material llegue a comportarse de forma plástica en la fisura. En este caso, el material se comporta de forma lineal frente a las cargas (Figura 2.28a). Sin embargo, el fallo será dúctil cuando el material durante la fisuración se comporte de forma plástica, retardando la propagación de la fisura. En este caso, después de la carga máxima que puede soportar el material, éste se comporta de forma no lineal [248], Figura 2.28b. Por otro lado, la tenacidad se define como la capacidad de soportar esfuerzos superiores al máximo sin llegar a romper, es decir, los materiales tenaces absorben energía durante la deformación [249].

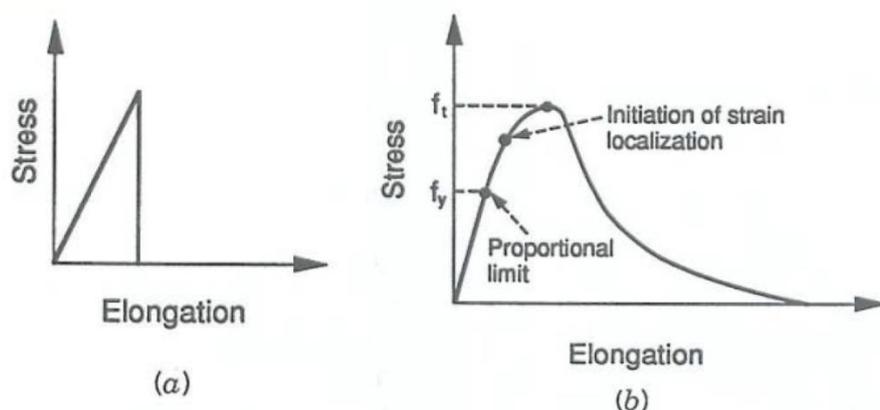


Figura 2.28. Curvas tensión-desplazamiento para materiales: (a) con un comportamiento lineal y (b) con un comportamiento no lineal [248].

La curva carga-desplazamiento de mezclas asfálticas a temperaturas medias tendrá una forma similar a la de la Figura 2.28b. El primer tramo de la curva se caracteriza por ser lineal correspondiéndose con un estado inicial de la mezcla. Justo después comienza el tramo no lineal caracterizado por el comienzo de las microfisuras en el material. Una vez alcanzado el pico de la curva, comienza una primera zona que llegaría aproximadamente hasta el punto de inflexión de la curva, en la cual se forman las macrofisuras. Este tramo se denomina fase de fractura. En el último tramo se produce la inestabilidad del proceso de propagación de la fisura hasta llegar a la fractura total de la mezcla.

Los mecanismos de fractura pueden ser descritos por dos métodos: el enfoque de la intensidad de tensiones y el enfoque de la energía. Un concepto importante en el enfoque de la

intensidad de tensiones es el factor de intensidad de tensiones, el cual se define según el mecanismo que provoca la fisura, teniendo en consideración los modos de propagación de la fisura. Para el caso que interesa aquí, modo I, el factor de intensidad de tensiones tiene la siguiente expresión:

$$K_I = f(a, D)\sigma_t\sqrt{\pi a} \quad (2.4)$$

donde K_I es el factor de intensidad de tensiones, $f(a, D)$ es una constante que depende de la geometría, σ_t son las tensiones de tracción y a es la longitud de la fisura (Figura 2.29).

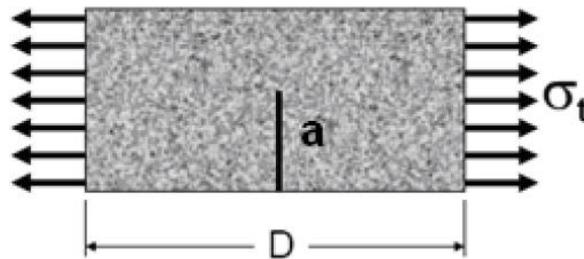


Figura 2.29. Geometría del modo I de fractura [250].

La fisura comienza a propagarse cuando la tensión en el inicio de la fisura alcanza la resistencia a fractura, momento en que el factor de intensidad de tensiones llega a un límite superior denominado factor de intensidad crítico de tensiones, K_{IC} .

Dentro del enfoque de la energía se definen dos parámetros para caracterizar el comportamiento a fractura: la integral de contorno J y la energía de fractura (G_f). La integral de contorno J caracteriza la velocidad de liberación de energía para materiales no lineales y se mide por el campo de deformación plástico de los materiales elasto-plásticos. Esta energía puede determinarse experimentalmente como el área bajo la curva carga-desplazamiento para diferentes longitudes de entalla.

La energía de fractura se define como la cantidad trabajo necesaria para crear una nueva superficie o una fisura por unidad de longitud [244], Figura 2.30. Este parámetro es considerado como el más apropiado para describir la fractura de las mezclas asfálticas [251].

La energía de fractura puede determinarse como el área bajo la curva carga-desplazamiento dividida por la superficie de fractura, ecuación 2.5.

$$G_F = \frac{A_f}{BL} \quad (2.5)$$

donde G_F es la energía de fractura (J/m^2), A_f es el área bajo la curva carga-desplazamiento (kNmm), B es el espesor de la probeta (mm) y L es la longitud del ligamento.

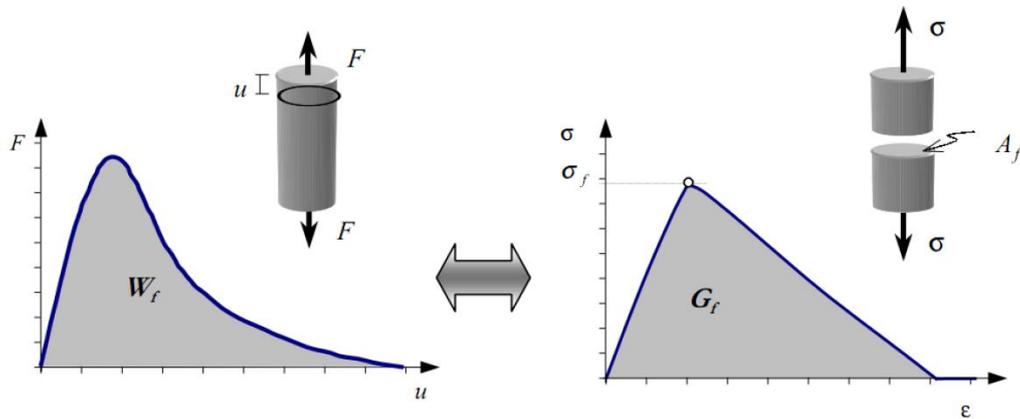


Figura 2.30. Forma esquemática de obtención de la energía de fractura [247].

3.1.1. Ensayos monotónicos para la determinación del fallo por fisuración

Este tipo de ensayos permiten obtener las propiedades de las mezclas relacionadas con su resistencia y deformación. Así, es posible determinar parámetros relacionados con la resistencia a la fisuración de la mezcla como son la deformación de rotura, el módulo de rigidez, la carga máxima o la energía disipada durante la fisuración.

Algunos de los ensayos monotónicos que permiten obtener los parámetros relacionados con el proceso de fisuración de las mezclas se muestran en la Tabla 2.8.

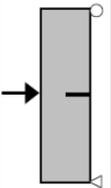
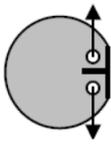
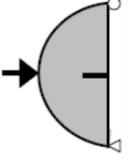
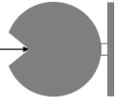
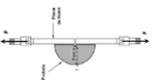
3.2. Comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas

En ingeniería, el fenómeno de fatiga está asociado al deterioro que se produce en un material como consecuencia de la aplicación de cargas repetidas con una magnitud muy inferior a la resistencia máxima que puede soportar el material [252]. La norma europea EN 12697-24 [253] define fatiga como la reducción de la resistencia de un material bajo la aplicación repetida de una carga cuando se compara con la resistencia bajo la aplicación individual de una carga.

En el caso de los pavimentos asfálticos, la repetición de las cargas producidas por el tráfico, junto con las tensiones térmicas debidas a las variaciones de temperatura, van dando lugar a la pérdida de propiedades mecánicas de la sección y de la estructura del firme, traduciéndose en una fisuración, que con tiempo suficiente progresará produciendo su rotura [254]. Es por este motivo que, para el dimensionamiento de un firme, es necesario conocer el comportamiento y la resistencia a fatiga que tendrán todas las capas de la mezcla bituminosa que lo componen.

La fisuración por fatiga de las capas de mezcla asfáltica y reflexión de fisuras a través de las capas bituminosas del firme son uno de los mecanismos de deterioro que sufren los pavimentos durante toda su vida en servicio [255].

Tabla 2.8. Ensayos desarrollados para obtener las propiedades de fractura en las mezclas bituminosas (modificado a partir de Valdés [250]).

Ensayo	Tipo de Ensayo	Ventajas	Limitaciones	Dimensiones	Referencias
Ensayo de viga entallada (<i>Single-edge notched beam, SE(B)</i>)		Simple configuración de carga. Mayor área de fractura	Presenta dificultad en su aplicación a testigos	Área de fractura 7500 mm ²	[259, 260, 261]
Ensayo de disco compacto a tracción (<i>Disk-shaped compact test, DC(T)</i>)		Mayor área de fractura. Ensayo de fractura normalizado (ASTM D7313-07)	Complejidad en la elaboración de probetas y aplicación de testigos. Derivación de la fisura. Temperatura de ensayo	Área de fractura 5500 mm ² e = 50 mm I = 110 mm	[262, 263]
Ensayo de flexión en probeta semicircular (<i>Sem-circular bending test, SCB</i>)		Fácil aplicación a probetas y testigos. Simple configuración de cargas. Menor cantidad de muestras y testigos	Complejo estado tensional. Lugar de aplicación de la carga influye en la correcta propagación de la fisura	Área de fractura 3750 mm ² e = 50 mm I = 75 mm	[264]
Barcelona Tracción Directa, <i>BTD</i>		Fácil elaboración de probetas	No aplicable a testigos. Granulometría específica	Área de fractura 3549 mm ² e = 35 mm I = 101,4 mm	[265]
Cataluña Tracción Directa, <i>CTD</i>		Estado tensional de tracción pura. Fácil interpretación de los resultados	Menor área de fractura. Elaboración de las probetas y su aplicación a testigos. Repetitividad del ensayo	Área de fractura 2000 mm ² e = 40 mm I = 50 mm	[266]
<i>Dog-Bone Direct Tension Test, DBDT</i>		Concentración de tensiones localizadas en plano de falla. Plano de falla conocido. Fabricación a partir de probetas cilíndricas (compactador giratorio Φ=150 mm)	Equipos requeridos. Dificultad de la fabricación de probetas	No se registran dimensiones exactas e = 1,5 pulg. mezclas densas e = 2 pulg. mezclas abiertas	[218]
Ensayo de propagación de fisuras de disco con entalla		Fácil aplicación a probetas y testigos	-	Probetas tipo Marshall	[267]
Ensayo Fénix		Fácil aplicación a probetas y testigos. Temperatura de ensayo	-	No se registran dimensiones exactas	[268]

El fenómeno de la fatiga de los materiales fue estudiado por primera vez durante la segunda mitad del siglo XIX por Whöler en 1858 [256], el cual estudiaba la ruptura prematura de los ejes de las locomotoras de la época [224, 257, 258]. Fruto de sus estudios Whöler desarrolló las Curvas S-N o Curvas de Whöler (Ecuación 2.6 y Figura 2.31), mediante las cuales poder determinar la vida útil de un material en términos de aplicaciones de carga que puede soportar, para un esfuerzo dado.

$$\sigma = a \cdot N^{-b} \quad (2.6)$$

donde σ es la tensión impuesta, a y b los parámetros regresión que se ajustan mediante datos experimentales y N el número de ciclos hasta fallo.

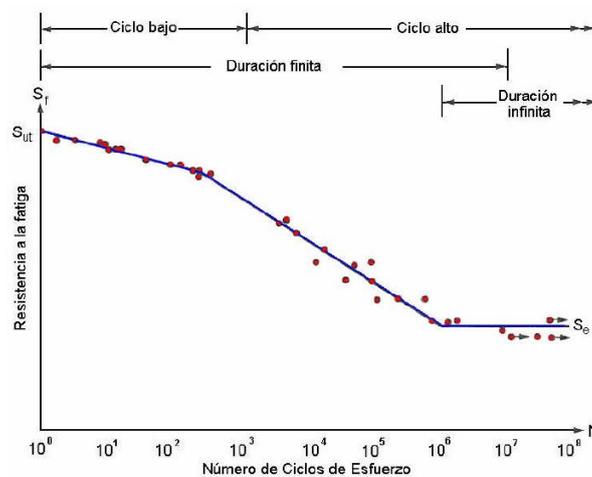


Figura 2.31. Curva de Whöler [269].

Sin embargo, el deterioro por fatiga en mezclas asfálticas no se tuvo en cuenta hasta 1955 cuando la AASHO (*American Association of State of Highways Officials*) lo incluyó en el diseño de firmes. Más tarde Pell, *et al.* [257] determinaron que era posible emplear las curvas de Whöler en los materiales bituminosos.

La fatiga en las mezclas bituminosas supone una pérdida de su resistencia, lo cual queda reflejado en la disminución de su rigidez y también en la aparición de fisuras debidas al aumento de deformaciones superficiales. Así, a la hora de estudiar la resistencia a fatiga de las mezclas bituminosas es necesario tener en consideración las características mecánicas que influyen en la misma:

- **Módulo de rigidez.** Una mezcla con un módulo mayor tendrá una deformación inicial menor, volviendo más rápidamente a su estado inicial. Este valor depende de la viscosidad (directamente proporcional al módulo), el porcentaje de ligante y del contenido de huecos (a menor cantidad de huecos, mayor módulo).
- **Deformación crítica.** Es la deformación a partir de la cual el proceso de fatiga se acelera

y la deformación producida aumenta rápidamente hasta la rotura del material. Este valor no depende del estado tensional o la sollicitación aplicada a la mezcla durante la fatiga [270], Figura 2.32.

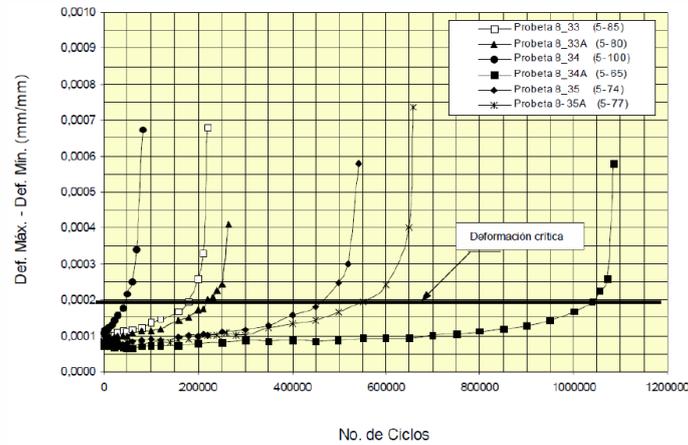


Figura 2.32. Evolución de la deformación unitaria con el número de ciclos de carga [271].

Cuanto mayor sea el módulo de la mezcla y mayor sea su deformación crítica, mejor será su comportamiento a fatiga (Figura 2.33).

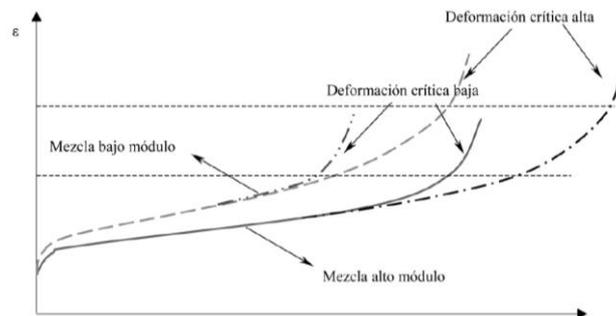


Figura 2.33. Influencia del módulo y de la deformación crítica en el fallo por fatiga [270].

La fisuración por fatiga de las mezclas asfálticas también ha sido analizada mediante el enfoque de la mecánica de la fractura, basado en la ley de Paris [272] para la propagación de fisuras:

$$\frac{dc}{dN} = A \cdot K_I^n \quad (2.7)$$

donde dc/dN es el incremento de la longitud de la fisura en función del número de ciclos, c es la longitud de la grieta, N es el número de ciclos de carga, A y n son parámetros dependientes del material y K_I es el factor de intensidad de tensiones.

La fisuración por fatiga de las mezclas bituminosas ha sido también analizada mediante la aplicación de la Ley Paris para propagación de fisuras. En un análisis descriptivo, Baaj, *et al.*

[273], señalan que el proceso de degradación de fatiga de una mezcla, puede establecerse en tres etapas o fases (Figura 2.34):

Fase I. Al principio del ensayo, también llamada *etapa de adaptación*, se caracteriza por el inicio de la microfisuración, produciéndose un descenso muy importante y brusco del módulo dinámico que, según Di Benedetto, es debido a que se produce un calentamiento de la mezcla por su comportamiento viscoso (disipación viscosa interna). En esta pérdida de módulo también tiene influencia la tixotropía.

Fase II. Llamada también *fase de fatiga*, se denomina quasi estacionaria ya que durante esta fase el módulo decrece de una forma lineal, de más o menos pendiente en función de si la amplitud de deformación aplicada es mayor o menor. Esta fase se caracteriza por el rol más preponderante que toma el deterioro por fatiga en la evolución del daño de la mezcla, apareciendo en ésta las macrofisuras producto de la unión de las microfisuras generadas en la fase anterior.

Fase III. Al final del ensayo, en la *etapa de ruptura*, se produce un descenso súbito del módulo asociado a la interconexión de las macrofisuras, las cuales progresan rápidamente hasta el fallo total de la mezcla.

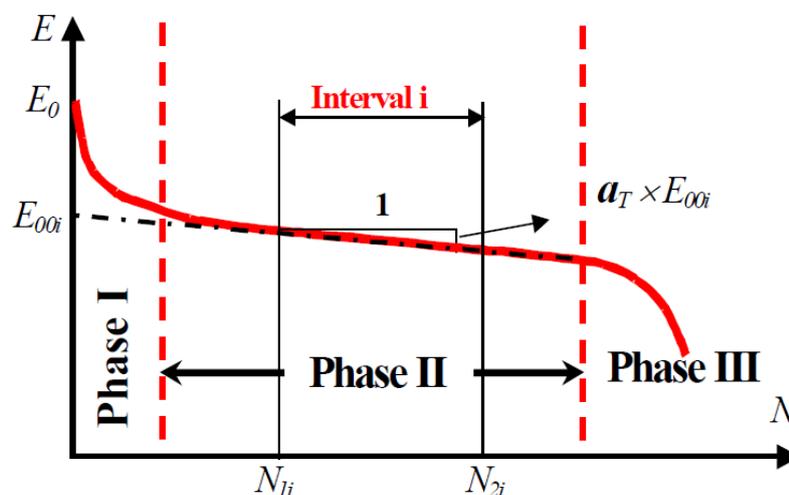


Figura 2.34. Etapas o fases del proceso de degradación de una mezcla asfáltica [273].

Para analizar la deformación debida a la aplicación de cargas repetidas o estimar la resistencia a la fisuración por fatiga de las mezclas asfálticas se recurre normalmente a las leyes de fatiga de las mismas.

3.2.1. Leyes de fatiga

La determinación de las leyes que rigen el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas es fundamental, ya que permiten predecir la vida a fatiga del pavimento, ayudando

al desarrollo y mejora en el diseño de mezclas asfálticas. Estas leyes de fatiga, obtenidas experimentalmente en el laboratorio, tienen la siguiente expresión:

$$\log N = a - b \cdot \log \varepsilon \tag{2.8}$$

donde N es el número de aplicaciones de carga hasta producir el fallo por fatiga del material considerado y ε es la deformación a la que es sometido el material en cada aplicación de carga.

Existe una relación entre la pendiente de la ley de fatiga de la mezcla y su módulo (a mayor módulo, menor pendiente). También existe una clara correlación entre la deformación crítica y la deformación de la mezcla en el primer ciclo (a mayor deformación crítica, mayor deformación en el ciclo 1 y, por lo tanto, más desplazada hacia arriba estará la ley de fatiga del material). Por este motivo, para una mezcla sometida a la misma sollicitación, cuanto mayor sea su módulo y mayor su deformación crítica, mejor será su comportamiento a fatiga (Figura 2.35).

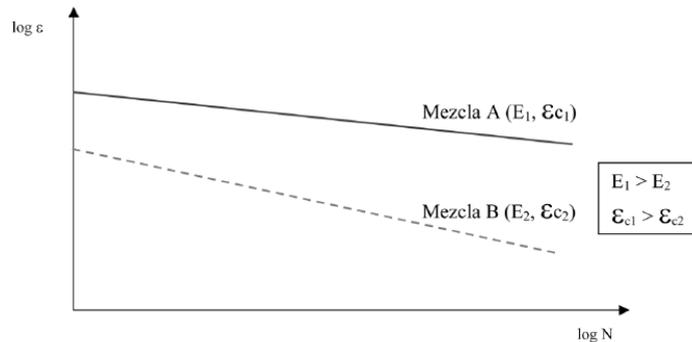


Figura 2.35. Distintas leyes de fatiga según su módulo y deformación crítica [270].

Existe un nivel de carga aplicada por debajo de la cual el material tiende a tener una vida a fatiga ilimitada. Ese nivel marca el denominado límite de resistencia a fatiga o *endurance limit*, el cual se representa como la asíntota formada por la curva clásica de Wöhler [256], Figura 2.36. El estudio y determinación de su valor aproximado resulta fundamental en el diseño de pavimentos de larga duración [274, 275].

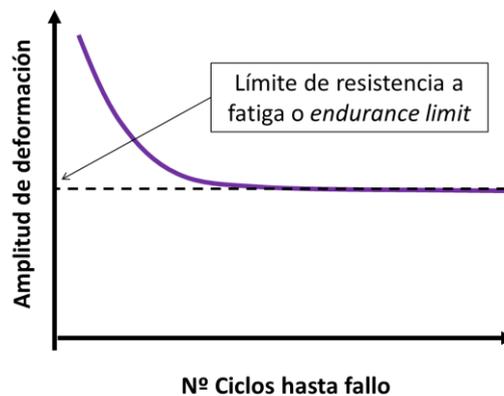


Figura 2.36. Curva clásica de fatiga donde se observa el límite de resistencia a fatiga.

3.2.2. Parámetros de influencia en el comportamiento a fatiga

Para un mejor conocimiento del fenómeno de la fisuración por fatiga es importante analizar las propiedades que influyen en la resistencia a la fisuración de las mezclas asfálticas. Éstos se pueden dividir en parámetros internos, los cuales influyen directamente en la fabricación de la mezcla, y parámetros externos, los cuales soportan las carreteras durante su vida de servicio.

Parámetros internos

- **Porcentaje de huecos.** Diversos autores coinciden en que a menor contenido de huecos, mayor es la resistencia a la fisuración (Figura 2.37) [276, 277, 278]. Igualmente, la vida a fatiga de la mezcla aumenta al disminuir el contenido de huecos [279, 280].

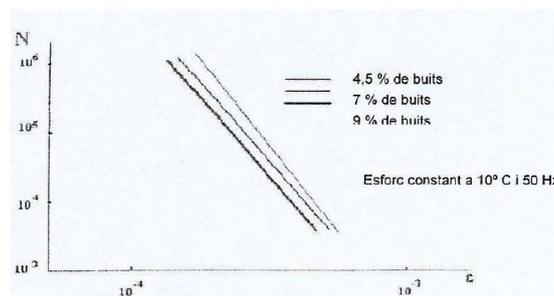


Figura 2.37. Efecto del porcentaje de huecos en la vida a fatiga de la mezcla [279].

- **Tipo de ligante.** La consistencia y la viscosidad del ligante son las principales responsables del comportamiento del ligante. Así, a temperaturas bajas la mezcla se comporta de forma frágil disminuyendo su resistencia a la fisuración. La viscosidad del ligante se encuentra ligada con la envuelta de los áridos, los cuales presentarán una mejor envuelta con betunes menos viscosos [1]. Así la vida a fatiga de las mezclas aumenta con el uso de ligantes de baja viscosidad [114]. Sin embargo, la elección del ligante dependerá de la zona (ligantes menos viscosos en zonas de bajas temperaturas y más viscosos en zonas de temperaturas altas). Pell [281] demostró que la vida a fatiga de ligantes de penetración alta es menor que la de ligantes de menor penetración. Myre [282] sugirió usar ligantes más duros en zonas cálidas. Además concluyó que las mezclas con ligantes más duros mostraron un mejor comportamiento a fatiga bajo un ensayo a deformación controlada. En última instancia, la viscosidad del ligante aumentará a medida que se envejece la mezcla, volviéndose más frágil [283].
- **Contenido de ligante.** Harvey y Tsai [280] demostraron que la vida a fatiga aumenta con el aumento del contenido de ligante y la disminución del contenido de huecos. La Figura 2.38 muestra el efecto del contenido de ligante en la vida a fatiga de mezclas con áridos de diferentes texturas [284]. Monismith [285] mostró que a medida que el contenido de ligante aumenta, la vida a fatiga aumenta, por un aumento de la rigidez de la mezcla [284].

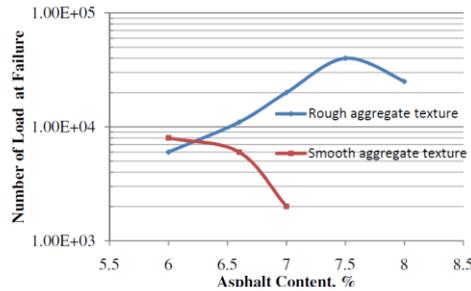


Figura 2.38. Efecto del contenido de ligante [284].

- **Espesor de la película de ligante.** Espesores de la película de ligante pequeños conllevan un aumento de la fragilidad de la mezcla por efecto de su envejecimiento prematuro.
- **Dureza del ligante.** El comportamiento del ligante incide directamente en el comportamiento reológico de la mezcla. Así, betunes más duros aumentan la rigidez de la mezcla, mientras que los más blandos van perdiendo su resistencia al deformarse, mostrando una pendiente de la ley de fatiga más elevada.
- **Contenido de fíller.** El aumento del contenido de fíller disminuye la cantidad de huecos intergranulares, aumentando la compacidad de la mezcla y con ello, su módulo de rigidez. Si la cantidad de finos es demasiado alta, las características mecánicas de la mezcla empeorarán.
- **Tipo de fíller.** Las características del fíller (superficie específica, capacidad de absorción, entre otros) influye en las de la mezcla como son la densidad o el módulo de rigidez, y por ello, en la resistencia a la fatiga.
- **Granulometría.** Para granulometrías más continuas, el envejecimiento se retrasa y, por lo tanto, la formación de fisuras por efecto de este [286]. Por el contrario, las mezclas más porosas se ven más afectadas por el envejecimiento, fragilizándose con rapidez [218]. La Figura 2.39 muestra diferentes leyes de fatiga según la granulometría de la mezcla. La vida a fatiga es menor en mezclas con granulometrías discontinuas. Además dentro de las continuas, las mezclas con mayor resistencia a fatiga son las semidensas, seguidas por las densas y, por último, las gruesas. Monismith y Deacon [285] concluyeron que en ensayos a tensión controlada, las mezclas densas tienen una vida a fatiga mayor que las mezclas abiertas, lo cual contradice al trabajo de Freeme y Marais [287], que afirma que las mezclas abiertas tienen una mejor respuesta a fatiga que las mezclas continuas normalmente usadas en Estados Unidos. Sin embargo, autores como Jajiliardo [283] señalan que la granulometría no tiene efecto en la fisuración.
- **Forma y textura de los áridos.** El contenido de huecos en la mezcla es superior al usar áridos angulosos debido a que su superficie rugosa impide una óptima compactación [288]. Sin embargo, con una buena granulometría pueden dar lugar a mezclas más rígidas que los áridos redondeados. Por otro lado, el porcentaje de ligante necesario en mezclas

con áridos rugosos es superior que en mezclas con áridos lisos, mejorando la resistencia a fatiga de la mezcla. Sin embargo, Pell y Cooper [289] afirmaron que el uso de grava más redondeada proporciona una vida a fatiga mayor que la de la roca triturada.

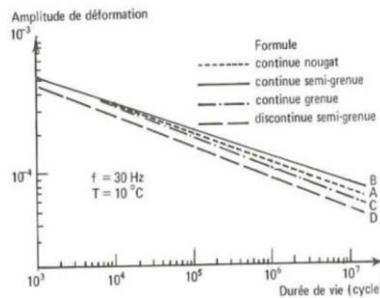


Figura 2.39. Leyes de fatiga para distintas granulometrías [290].

- **Tipo de árido.** Los áridos graníticos, a bajas temperaturas, presentan un mejor comportamiento que los calizos [277, 291], mostrando una mejor resistencia a la fisuración. Por otro lado, las mezclas fabricadas con áridos rugosos y con mayor angulosidad presentan un mejor comportamiento a fisuración [241, 292]. La naturaleza mineralógica de los áridos influye en el tipo de rotura de la mezcla, así como en su adhesividad con el betún, lo cual modificará el valor del módulo de rigidez y con ello la resistencia a fatiga del material.
- **Módulo de rigidez.** Esta propiedad relaciona esfuerzo y deformación. Durante su vida de servicio, las mezclas aumentan su rigidez por efecto del envejecimiento, aumentando su fragilidad y con ello su resistencia a la fisuración.
- **Aditivos.** Éstos tienen como objetivo mejorar el comportamiento de las mezclas, lo cual influye en el comportamiento a fatiga de las mismas.

Parámetros externos

- **Tipo de carga.** La respuesta a fatiga depende de la intensidad, frecuencia y forma de la carga aplicada (Figura 2.40). La vida a fatiga de las mezclas tiende a ser menor al aumentar la frecuencia y el nivel de carga aplicada.

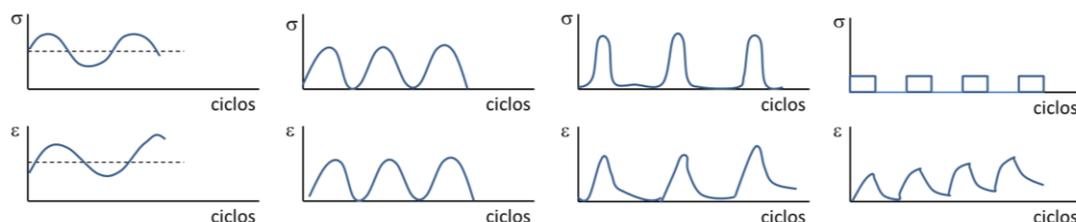


Figura 2.40. Diferentes patrones de carga.

- **Temperatura.** El módulo de rigidez se ve influenciado por la temperatura, el módulo aumenta con la bajada de la temperatura y disminuye al aumentar la misma (Figura 2.41).

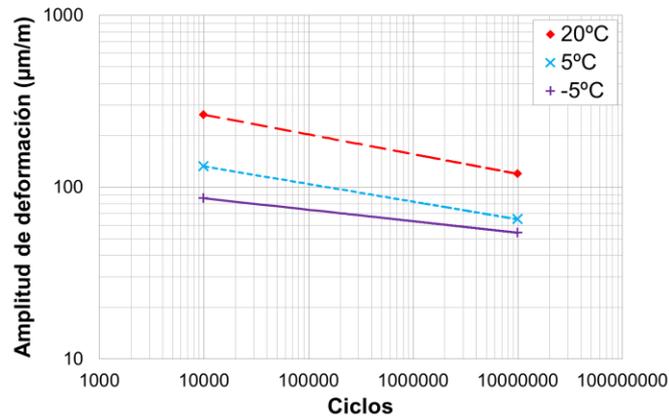


Figura 2.41. Influencia de la temperatura en la vida a fatiga.

- **Periodos de reposo.** Diversos estudios demuestran que la introducción de periodos de reposo permiten alargar la vida a fatiga de las mezclas.
- **Envejecimiento.** Este fenómeno depende principalmente del ligante de la mezcla bituminosa y se debe a la pérdida de volátiles y oxidación del ligante durante la fabricación de la mezcla, y a la oxidación del material durante su vida de servicio.
- **Humedad.** Éste es un elemento clave en el deterioro de las mezclas asfálticas, la cual puede llegar a producir la pérdida de cohesión, la fisuración por adhesión entre asfalto y agregado o la degradación por fractura de partículas de árido por efecto de las heladas.

3.2.3. Ensayos para la determinación del fallo por fatiga

En los ensayos a fatiga de laboratorio, existen fundamentalmente dos modos de carga: ensayos a tensión controlada y ensayos a deformación controlada (Figura 2.42). En los primeros, la tensión se mantiene constante durante todos los ciclos de carga, siendo la deformación la que va incrementándose a lo largo de ellos. En los ensayos a deformación controlada es la deformación la que se mantiene constante, variando la tensión, la cual va disminuyendo. De acuerdo con Monismith y Deacon [285], el fallo en los ensayos a tensión controlada se produce más rápidamente. Según Brown [293], esto se debe a que la propagación de la fisura es más rápida al permanecer siempre la tensión constante.

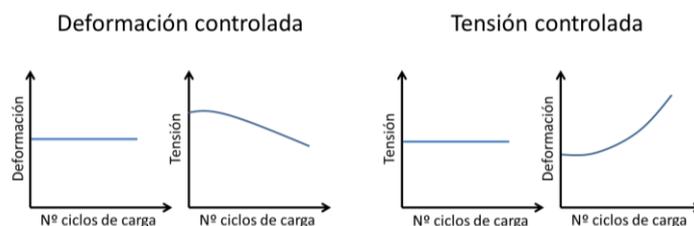


Figura 2.42. Evolución de la tensión y la deformación según el modo de carga aplicado.

Diversas investigaciones se han realizado para analizar la influencia del modo de carga aplicado en la evaluación de la resistencia a fatiga de las mezclas. Un resumen de las principales conclusiones de estos estudios se muestra en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9. Comparación entre los dos modos de carga [238].

VARIABLES	CONTROLLED-STRESS (LOAD)	CONTROLLED-STRAIN (DEFLECTION)
Thickness of asphalt concrete layer	Comparatively thick asphalt bound layers	Thin asphalt-bound layer; < 3 inches
Definition of failure; number of cycles	Well-defined since specimen fractures	Arbitrary in the sense that the test is discontinued when the load level has been reduced to some proportion of its initial value; for example, to 50 percent of the initial level
Scatter in fatigue test data	Less scatter	More scatter
Required number of specimens	Smaller	Larger
Simulation of long-term influences	Long-term influences such as aging lead to increased stiffness and presumably increased fatigue life	Long-term influences leading to stiffness increase will lead to reduced fatigue life
Magnitude of fatigue life, N	Generally shorter life	Generally longer life
Effect of mixture variables	More sensitive	Less sensitive
Rate of energy dissipation	Faster	Slower
Rate of crack propagation	Faster than occurs in situ	More representative of in-situ conditions
Beneficial effects of rest periods	Greater beneficial effect	Lesser beneficial effect

Hoy en día, los ensayos más aceptados por la comunidad científica para estudiar el fallo por fatiga de las mezclas son los que se muestran en la Tabla 2.10. La mayoría de estos ensayos se basan en la aplicación de una serie de cargas cíclicas a una probeta, en las que se mantiene constante la tensión, la deformación o el desplazamiento aplicado hasta que se produce el fallo. El objetivo de estos ensayos suele ser determinar la ley de fatiga del material, para así poder relacionar el nivel de deformaciones o esfuerzos a los que la mezcla se ve sometida con el número de ciclos que ésta puede soportar antes de llegar al fallo.

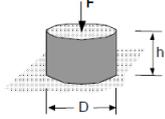
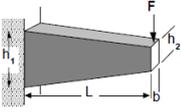
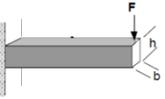
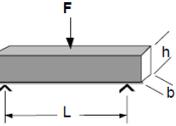
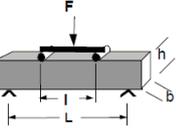
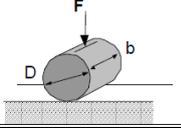
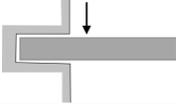
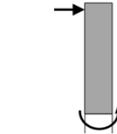
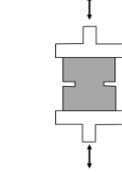
3.2.4. Criterios de fallo

La determinación del fallo de una probeta de mezcla bituminosa no suele ser nada fácil debido al comportamiento viscoelasto-plástico de este material. En la actualidad, para determinar si una probeta ha fallado, se usan criterios relacionados con las propiedades mecánicas de las mezclas. Algunos de los criterios de fallo definidos en la literatura son los siguientes:

Criterio convencional. Según este criterio el fallo del material se produce cuando la pérdida de módulo de rigidez inicial es superior al 50% [294, 295, 296], Figura 2.43a.

Criterio de daño. Baaj, *et al.* [273] definieron el fallo como el punto de la curva en el que se produce la transición entre la segunda y tercera fase, Figura 2.43b.

Tabla 2.10. Configuraciones de los ensayos de fatiga comúnmente empleados para evaluar mezclas bituminosas (modificado a partir de Alonso [271]).

Ensayo	Configuración	Referencias
Tensión-compresión (T/C)		[297]
Flexión en dos puntos sobre probetas trapezoidales (2PB)		[253]
Flexión de dos puntos sobre probetas prismáticas		[253]
Flexión en tres puntos sobre probetas prismáticas(3PB)		[253, 298]
Flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas (4PB)		[253, 299]
Tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (IDT)		[253, 300]
Ensayos triaxiales		[301]
Flexión por rotación		[301]
Ensayo EBADE		[254]

Criterio de energía disipada. En ensayos de fatiga controlados por deformación, la energía que la mezcla soporta en cada ciclo de carga decrece en los primeros ciclos del ensayo para luego estabilizarse en un valor prácticamente constante hasta que de nuevo se produce un descenso brusco en pocos ciclos, que se define como el fallo total del material, Figura 2.43c.

Criterio de ratio de energía disipada. Se basa en encontrar el punto en el cual se inician las microgrietas y se transforman en fisuras visibles. En ensayos a deformación controlada, dicho punto se establece como aquel a partir del cual la curva de ratio de energía disipada (cociente

entre la energía total disipada en el ensayo y la energía disipada en el último ciclo) con los ciclos de carga se separa de una línea tangente a 45° [302, 303, 304], Figura 2.43d.

Criterio de la deformación de rotura. Este criterio se basa en que el fallo por fatiga se produce en el punto en que el aumento de la curva deformación-ciclos se hace crítico, Figura 2.43e.

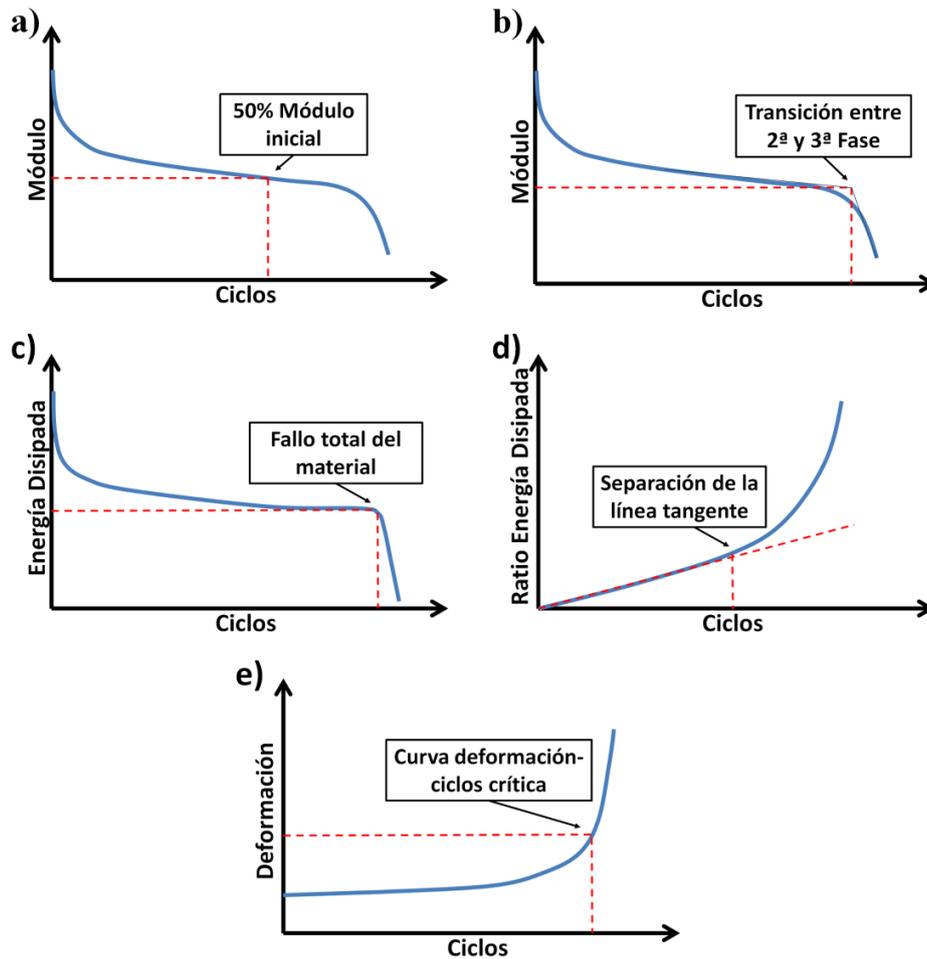


Figura 2.43. Criterios de fallo: a) Criterio convencional, b) Criterio de daño, c) Criterio de energía disipada, d) Criterio de ratio de energía disipada y e) Criterio de la deformación de rotura.

Capítulo 3.

Metodología

En este capítulo se justifican y describen las características de los materiales utilizados durante el desarrollo de la investigación, los métodos de ensayo empleados y la planificación de ensayos que se ha llevado a cabo.

El objetivo principal de este trabajo consiste en el estudio del efecto del envejecimiento y de la acción del agua en la fisuración de las mezclas asfálticas. Para ello se ha seleccionado una mezcla asfáltica semidensa, fabricada con diferentes tipos de betún, que será envejecida y/o sometida a la acción del agua antes de su caracterización, comparándola con la de la mezcla de referencia no acondicionada.

El estudio se ha dividido en tres partes. En la primera de ellas se ha evaluado el efecto del envejecimiento y de la acción del agua en la fractura y la fatiga de la mezcla a partir de los parámetros que caracterizan ambos procesos. Durante la siguiente etapa de este trabajo, se ha evaluado la fatiga de las mezclas a partir de la curva clásica de fatiga que relaciona la deformación a la que está sometida con el número de ciclos que la mezcla es capaz de soportar para esa determinada deformación. Por último, en la tercera parte del trabajo se ha evaluado el efecto de la introducción de periodos de reposo en la resistencia a fatiga de la mezcla.

Las mezclas han sido sometidas respectivamente a envejecimiento o daño por humedad para estudiar el efecto que cada fenómeno tiene sobre la resistencia a fisuración de las mismas. Debido a que el daño por humedad y la degradación de las mezclas por efecto del envejecimiento no actúan de manera separada en el firme y que el uno influye en el otro, también se analiza la fisuración de las mezclas sometidas a ambos procesos de daño. En este caso, antes de ensayar la mezcla, primero será envejecida y, una vez envejecida, será sometida a

la acción del agua.

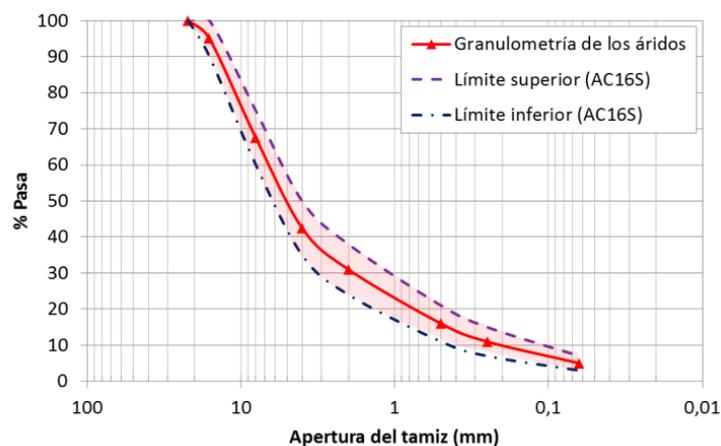
Para el estudio de la resistencia a fisuración se han usado dos nuevos ensayos desarrollados por el Laboratorio de Caminos del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña: el ensayo Fénix, que evalúa la resistencia a fisuración de las mezclas bajo cargas lentas y monotónicas; y, el ensayo EBADE, que evalúa la resistencia a fisuración bajo cargas rápidas y cíclicas.

Durante la estancia en la Universidad de Nottingham, se ha realizado un estudio de la fatiga sobre mezclas no acondicionadas y envejecidas, aplicando el ensayo de fatiga de flexión en dos puntos sobre probetas trapezoidales.

Por último, durante la estancia en el Instituto Superior Técnico de la Universidad de Lisboa se ha estudiado el efecto del envejecimiento mediante UV y de la acción del agua en la fisuración de mezclas asfálticas, usando para ello el ensayo de tracción indirecta. Además, los resultados de este procedimiento de envejecimiento mediante tratamiento UV, TEAGE (*Técnico Accelerated Ageing*), se han comparado con los obtenidos mediante el procedimiento de envejecimiento LTOA (*Long-Term Oven Aging*) definido por el SHRP [86]. Este trabajo se complementa con el estudio del efecto del uso de ligantes modificados con nanomateriales.

1. Materiales

Para el estudio del efecto del envejecimiento y de la acción del agua en la resistencia a fisuración de las mezclas asfálticas se ha seleccionado una mezcla asfáltica semidensa tipo AC16S, con granulometría centrada en el huso (Figura 3.1).



penetración 50/70, normalmente utilizado en mezclas asfálticas convencionales y, por otro, un betún modificado con polímeros, PMB 45/80-65 (Tabla 3.1). En ambos casos, el contenido de betún ha sido del 4,5% sobre el peso de mezcla. Este porcentaje es el mínimo establecido por el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carretera y puentes (PG-3) para una mezcla semidensa situada en la capa de rodadura.

Tabla 3.1. Características de los betunes utilizados en la mezcla AC16S.

Propiedades	Unidad	Normativa	50/70	PMB 45/80-65
Betún Original				
Penetración a 25°C	(0,1 mm)	EN 1426	61	57
Punto de reblandecimiento	(°C)	EN 1427	50,9	65,3
Punto de fragilidad Fraass	(°C)	EN 12593	-14	-15
Punto de inflamación	(°C)	EN 2592	280	290
Resistencia al endurecimiento a 163°C (EN 12607-1)				
Variación de masa	(%)	EN 12607-1	0,1	0,29
Penetración a 25°C	(% p.o.)	EN 1426	66	64
Δ Punto de reblandecimiento	(°C)	EN 1427	7,6	10

Se han utilizado dos tipos de árido: calizo y granítico, procedentes de canteras próximas a la ciudad de Barcelona (España). El árido de naturaleza caliza procede de la cantera Foj, situada en el municipio de Vallirana, y el árido de naturaleza granítica procede de la cantera Berta, situada en el municipio de Castellbisbal.

Para el estudio del efecto de los periodos de reposo en la fatiga de la mezcla se ha seleccionado una mezcla discontinua, tipo BBTM 11A, con tamaño máximo de árido de 8 mm (Figura 3.2). Aunque la mezcla estudiada se encuadra dentro del huso granulométrico de una BBTM 11A, presenta una discontinuidad poco marcada, con lo cual cabe esperar que el contenido de huecos sea más bajo que el que presentan normalmente las mezclas discontinuas. Se han usado los mismos tipos de ligante descritos anteriormente: un betún de penetración 50/70 y un betún modificado con polímeros, PMB 45/80-65. Además de los anteriores, se ha usado un betún más duro de penetración 15/25. En este caso, el contenido de ligante ha sido del 5% sobre el peso de mezcla.

En el caso del trabajo realizado durante la estancia predoctoral en la Universidad de Nottingham, se ha intentado reproducir el tipo de mezcla usada en el estudio de la fisuración realizado en este trabajo (mezcla AC16S), así como las características de los ligantes. El árido usado para fabricar la mezcla ha sido de tipo calizo procedente de la cantera Tunstead.

Por último, en el trabajo realizado durante la estancia predoctoral en el Instituto Superior Técnico se ha seleccionado una mezcla semidensa tipo AC14 cuya granulometría se indica en la Figura 3.3. Para la fabricación de la mezcla se han usado tres tipos de ligante: un ligante de

referencia de penetración 35/50, un ligante modificado con nanoarcilla, tipo bentonita, y otro ligante modificado con nanopartículas de hierro. Los dos ligantes modificados se obtienen a partir del ligante de referencia. Las propiedades del ligante 35/50 se muestran en la Tabla 3.2. En todos los casos, el contenido de ligante ha sido del 4,5% sobre el peso de la mezcla. Para este trabajo se ha utilizado árido granítico y fíller calizo. La modificación del ligante ha sido realizada mediante la dispersión mecánica de las nanopartículas en el ligante usando un agitador de alta velocidad. El mezclado se ha realizado a 2.000 rpm durante 60 minutos a una temperatura de 60°C. En ambos casos, el porcentaje de nanopartículas sobre el total de ligante ha sido de un 4%.

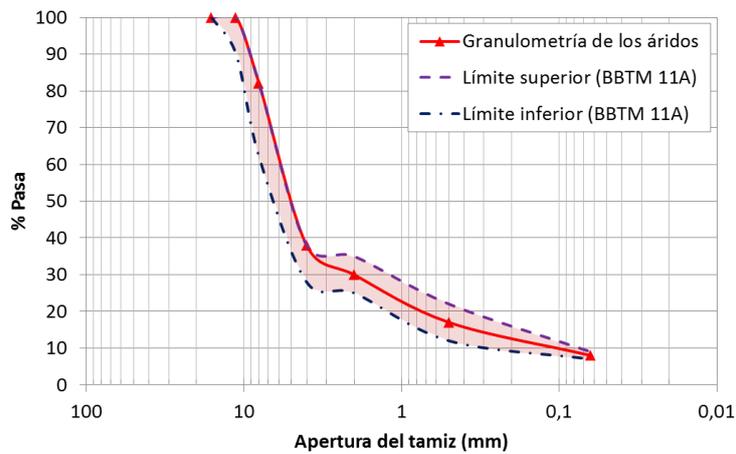


Figura 3.2. Granulometría de la mezcla BBTM 11A.

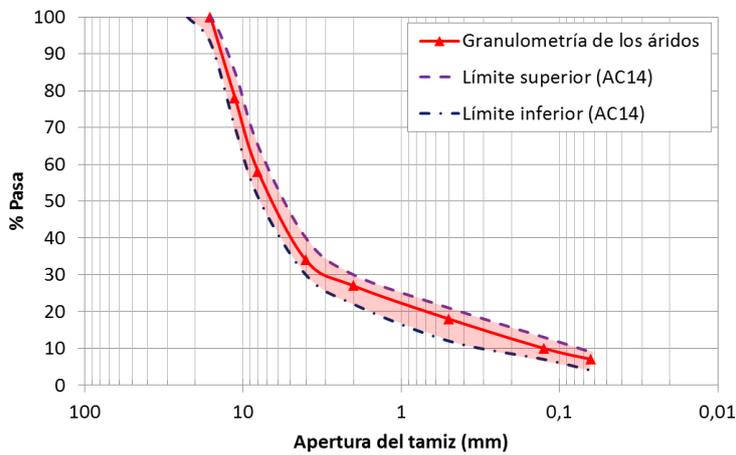


Figura 3.3. Granulometría de la mezcla AC14.

Tabla 3.2. Características de los betunes utilizados en la mezcla AC14.

Propiedades	Unidad	Normativa	35/50
Penetración a 25°C	(0,1 mm)	EN 1426	36,4
Punto de reblandecimiento	(°C)	EN 1427	57
Viscosidad dinámica a 135°C	(mPa.s)	EN 13302	670
Viscosidad dinámica a 160°C	(mPa.s)	EN 13302	177

2. Procedimientos de acondicionamiento de la mezcla

2.1. Procedimiento de envejecimiento

Para el estudio del efecto del envejecimiento, éste ha sido simulado en laboratorio siguiendo el protocolo de envejecimiento a largo plazo establecido por el comité RILEM ATB-TG5 [99]. Este protocolo de envejecimiento a largo plazo consiste en mantener la mezcla suelta, antes de compactar, en una estufa de convección a 85°C durante 9 días.

Aunque el protocolo de envejecimiento establecido por el comité RILEM establece un plazo para envejecer la mezcla de 9 días, después de analizar los resultados publicados por De la Roche, *et al.* [99], Van der Bergh [27] llegó a la conclusión de que un envejecimiento a 7 días da resultados similares, pudiendo reducir el tiempo para el análisis del efecto del envejecimiento. Además, tal y como observan los autores de este trabajo, el envejecimiento del betún a largo plazo establecido por el comité RILEM conduce a un envejecimiento superior comparado con los ensayos clásicos de envejecimiento de betunes.

Por tanto, en este trabajo el envejecimiento en laboratorio ha consistido en, una vez realizada la envuelta con el ligante, colocar la mezcla suelta, antes de su compactación, en bandejas en una estufa de convección (Figura 3.4). La mezcla suelta se ha mantenido en el horno de convección durante un periodo de 7 días a una temperatura de 85°C. Durante ese periodo la mezcla se ha agitado/removido en tres ocasiones, los días 2, 4 y 5, estableciéndose un intervalo de tiempo entre agitaciones de al menos 24 horas. La estufa en la cual se han envejecido las mezclas es de convección con el objetivo de mantener el aire en recirculación para homogeneizar la temperatura de toda la superficie.



Figura 3.4. Bandejas con la mezcla suelta envejeciéndose en el horno.

Una vez envejecida la mezcla, ésta se ha compactado siguiendo la metodología Marshall (compactación por impacto). Tras fabricar las probetas y calcular la densidad aparente y el volumen de huecos de cada una, se han cortado en función del ensayo a realizar. Si la probeta se ensaya a fractura (ensayo Fénix), ésta se ha cortado por la mitad, obteniendo dos probetas semicilíndricas. Por el contrario, si se ensaya a fatiga (ensayo EBADE), ésta se ha cortado de forma que se obtenga una probeta prismática con las dimensiones especificadas en dicho ensayo.

Las mezclas fabricadas en la Universidad de Nottingham, una vez envejecidas en las mismas condiciones que las utilizadas en España, se han compactado; en este caso la compactación ha sido por rodillo obteniendo una placa de mezcla bituminosa de la cual, una vez cortada, se han obtenido 10 probetas trapezoidales (Figura 3.5), sobre las que se ha obtenido la densidad aparente y el volumen de huecos.



Figura 3.5. De izquierda a derecha, placa de mezcla bituminosa, probetas obtenidas a partir de dicha placa y probeta trapezoidal.

Dos métodos de envejecimiento de mezclas asfálticas han sido usados en el trabajo realizado en el Instituto Superior Técnico de la Universidad de Lisboa: el procedimiento de envejecimiento TEAGE (*TEcnico Acelerated AGEing*), desarrollado por el Instituto Superior Técnico (IST) de la Universidad de Lisboa, y el procedimiento LTOA (*Long-Term Oven Aging*).

El método de acondicionamiento TEAGE es un proceso de envejecimiento de mezclas bituminosas usando la exposición a rayos UV y la humedad, cuyo objetivo principal es simular las condiciones ambientales a las que se encuentran los pavimentos durante su vida útil [305]. El equipo de envejecimiento TEAGE consta de dos lámparas ultravioleta equidistantes, las cuales irradian continuamente luz UV a las probetas situadas dentro del equipo (Figura 3.6). Este procedimiento para envejecer las mezclas también considera el efecto de la lluvia. Para ello, el equipo está preparado para someter las probetas a periodos de inmersión en agua durante el proceso de envejecimiento.



Figura 3.6. Probetas de mezcla bituminosa en el equipo de envejecimiento TEAGE.

El protocolo seguido en el trabajo realizado en la estancia predoctoral para envejecer las mezclas mediante TEAGE ha sido introducir las probetas en el equipo bajo la radiación UV durante 30 días. Además durante este periodo las probetas han sido sometidas a inmersión en agua dos veces al día durante 20 minutos.

Para envejecer las mezclas mediante el método de envejecimiento LTOA, las probetas de mezcla bituminosa, compactadas, se han mantenido en la estufa a 85°C durante 120 h (5 días) siguiendo el protocolo definido en el programa SHRP-A-383 [86].

En el caso de estudiar conjuntamente los fenómenos de envejecimiento y daño por humedad, una vez la mezcla envejecida ha sido compactada y cortada (en caso de que el ensayo lo requiera), se ha sometido a daño por humedad siguiendo el procedimiento de daño por humedad que se detalla en el siguiente apartado.

2.2. Procedimiento de daño por humedad

El procedimiento para evaluar el efecto del daño por humedad consiste en saturar y mantener en agua, a una temperatura de acondicionamiento elevada, el conjunto de probetas que se desea estudiar. En este trabajo, para simular el daño por humedad en el laboratorio se ha seleccionado el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 12697-12 [209], relativa al análisis de sensibilidad al agua en mezclas asfálticas.

El procedimiento seguido ha consistido en sumergir el conjunto de probetas, ya cortadas (en función de su posterior ensayo), en un recipiente de vacío lleno de agua destilada a 20°C de temperatura, en el cual se aplica vacío hasta obtener una presión absoluta de 6,7 kPa en un periodo de tiempo de 10 min. El vacío se mantiene durante 30 min. De esta manera el agua habrá entrado en todos los poros de la probeta. Una vez aplicado el vacío, las probetas se dejan a presión atmosférica sumergidas en el agua durante otros 30 min. Transcurrido este tiempo, las probetas se colocan en un baño de agua a 40°C durante un periodo de 72 h.

Transcurrido el tiempo de acondicionamiento, se ha procedido a sacar las probetas del baño de agua, dejándolas secar. Una vez la superficie de las probetas se ha encontrado totalmente seca, éstas se han pegado mediante una resina epoxi a las placas correspondientes al ensayo a realizar (Fénix o EBADE). Las probetas se ensayan una vez transcurridos tres días desde que se pegaron a las placas.

Este procedimiento de acondicionamiento también ha sido el usado durante la estancia predoctoral en el Instituto Superior Técnico de la Universidad de Lisboa. En este caso, una vez las probetas de mezcla bituminosa (tipo Marshall) han sido acondicionadas se han ensayado a tracción indirecta.

3. Ensayos

3.1. Fénix

El ensayo Fénix [268] es un ensayo monotónico de tracción directa a velocidad de deformación constante. En esencia consiste en determinar el esfuerzo necesario para fisurar una probeta semicilíndrica, aplicando un esfuerzo de tracción mediante dos placas pegadas a la probeta en su plano diametral, las cuales van sujetas a los anclajes de la prensa (Figura 3.7). La probeta presenta una pequeña ranura entre las dos placas para facilitar la zona de fisuración de la misma.

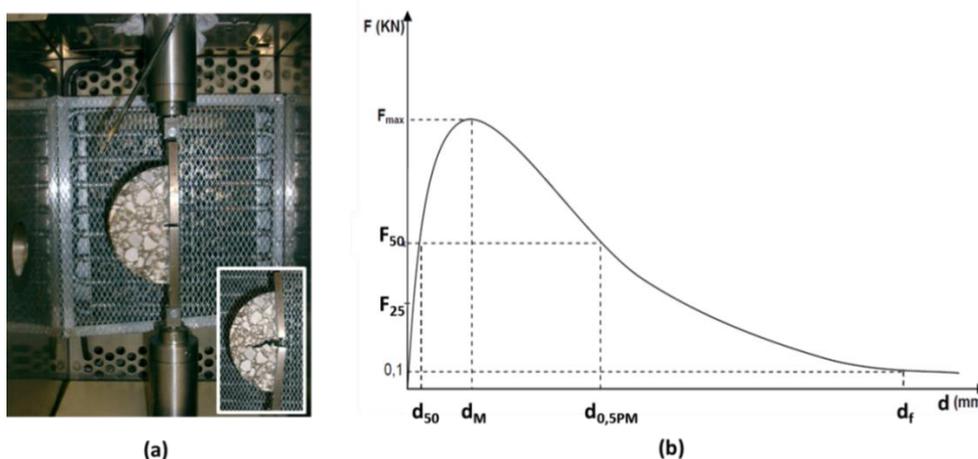


Figura 3.7. (a) Ensayo Fénix y fisura de la probeta después del ensayo, y (b) curva carga-desplazamiento [306].

El ensayo se realiza a una velocidad de desplazamiento constante de 1 mm/min y puede hacerse a diferentes temperaturas; en este trabajo las temperaturas de ensayo han sido 20, 5 y -5°C. Durante el ensayo se registra la carga aplicada en función del desplazamiento impuesto.

A partir de la curva carga-desplazamiento resultante del ensayo, se pueden definir una serie de parámetros relacionados con las características mecánicas y resistentes de la mezcla. En primer lugar, se observa un aumento casi lineal del esfuerzo aplicado, que depende de la rigidez de la mezcla. En el ensayo Fénix se define el Índice de Rigidez a Tracción, IRT , como la pendiente de la curva carga-desplazamiento entre el 25 y el 50% de la carga máxima.

$$IRT = \frac{F_{50} - F_{25}}{(d_{50} - d_{25})} \quad (3.1)$$

donde IRT es el Índice de Rigidez a la Tracción en kN/mm, F_{50} y F_{25} corresponden al 50% y al 25% de la carga máxima en kN y, d_{50} y d_{25} son los valores del desplazamiento en el 50% y 25% de la carga máxima en mm.

Por otra parte, el ensayo Fénix permite obtener la energía de rotura definida como la energía empleada por la máquina para que se produzca la fisuración total de la probeta. Este parámetro se encuentra relacionado con la cohesión de la mezcla, y se correspondería con la integral del área bajo la curva de carga-desplazamiento, dividido por la superficie de rotura. Cuanto mayor es la energía de rotura, G_F , mayor es la resistencia a la fisuración de la mezcla. A temperaturas bajas el valor de energía de rotura considerado en el ensayo Fénix coincide con la definición clásica de energía de fractura del material, pero a temperaturas medias, el valor de energía disipada en el proceso de rotura engloba, además de los valores de energía de fractura, otros conceptos como la energía de deformación, entre otros. El valor de la energía de rotura resulta más interesante a la hora de valorar la cohesión de la mezcla que el de la resistencia máxima, ya que tiene en cuenta todo el proceso de rotura del material tras la carga máxima, que en los materiales bituminosos es de gran importancia.

$$G_F = \frac{\int_0^{d_f} F(x) dx}{S} \quad (3.2)$$

donde G_F es la energía de rotura en J/m^2 , F es la fuerza en N, x es el desplazamiento en m, S es la superficie de fractura en m^2 y d_f es el desplazamiento al final del ensayo en m.

La respuesta dúctil de la mezcla es precisamente la que interesa tener en cuenta en el diseño de mezclas resistentes a la fisuración. No sólo es necesario un alto valor de la energía disipada, sino que, además, provenga en su mayoría de la zona de rotura de la probeta (después de la carga máxima). Esto estaría indicando que la mezcla es capaz de alcanzar una mayor deformación hasta su rotura, manteniendo parte de su resistencia desde que se inicia su fallo hasta que éste se produce realmente. Es por ello que se define el Índice de Tenacidad con el fin de valorar el comportamiento más o menos dúctil de la mezcla. Este parámetro se obtiene multiplicando el área de la curva carga-desplazamiento postpico por el desplazamiento realizado por la prensa hasta reducir la carga al 50% de su valor máximo.

$$IT = \frac{\int_{d_M}^{d_f} F(x) dx}{S} \cdot (d_{0,5PM} - d_M) \quad (3.3)$$

donde IT es el índice de tenacidad en $J/m^2 \cdot mm$, d_M es el desplazamiento correspondiente a la fuerza máxima en mm y $d_{0,5PM}$ es el desplazamiento en la parte descendente de la curva carga-desplazamiento correspondiente al 50% de la fuerza máxima en mm.

Como parámetro alternativo al índice de tenacidad se usa también la deformación correspondiente al 50% de la carga máxima en la zona postpico para valorar la ductilidad y tenacidad de la mezcla.

3.2. Ensayo EBADE (barrido de deformaciones)

Para evaluar el comportamiento a fatiga de las mezclas se ha utilizado el ensayo EBADE (Ensayo de BArrido de DEformaciones), desarrollado en el Laboratorio de Caminos de la UPC [254], tanto por su sencillez como por su rapidez, comparada con otros tipos de ensayos de fatiga.

El ensayo EBADE consiste en realizar un barrido de deformaciones en un ensayo cíclico de tensión-compresión. Para ello se aplican una serie de ciclos de carga, a un nivel de deformación constante, el cual va aumentando en magnitud, progresivamente, hasta que se produce el fallo del material. El número de ciclos establecido en cada escalón de deformación es de 5.000; el ensayo se realiza a una frecuencia de 10 Hz.

En la ejecución de este ensayo se utiliza una probeta prismática, en la cual se realizan dos ranuras en la zona central, con la finalidad de reducir el área de su sección intermedia e inducir en ella el fallo. La probeta no ha de tener unas dimensiones fijas y puede provenir del serrado de probetas cilíndricas, fabricadas por la metodología Marshall o por medio de una prensa giratoria, o del serrado de placas de 5-6 cm de espesor, fabricadas con rodillo para los ensayos normalizados de deformaciones plásticas o de fatiga a flexión de cuatro puntos. En este trabajo, las probetas prismáticas provienen del serrado de probetas cilíndricas fabricadas por la metodología Marshall. Las dimensiones de las probetas suelen ser de 5-6 cm de ancho y largo, y de 6-9 cm de altura (Figura 3.8a).

Estas probetas prismáticas son pegadas mediante una resina epoxi a unas placas de acero, que permiten fijarlas a las mordazas de la prensa. Sobre la probeta se colocan dos extensómetros, en la zona de fallo previamente inducida (uno a cada lado), que permiten medir las deformaciones durante el proceso de ensayo (Figura 3.8b).

Durante el ensayo se aplican series de 5.000 ciclos, cada serie con diferente amplitud de deformación, en orden ascendente, a una frecuencia de 10 Hz. Esta frecuencia es común en los

ensayos de fatiga y está relacionada con la velocidad de los vehículos y de la aplicación de cargas en el firme. Cada serie de 5.000 ciclos, a una misma amplitud de deformación, se le llama escalón de carga. Se han escogido 5.000 ciclos porque son suficientes para que el valor de la Densidad de Energía Disipada (DED) se estabilice en un escalón (siempre que el valor de deformación no sea muy elevado) y, además, porque permiten que el ensayo sea rápido en comparación con el método de barrido de tiempo. Para el ensayo de mezclas bituminosas, la amplitud de deformación en el primer escalón es de 25 $\mu\text{m}/\text{m}$, y cada 5.000 ciclos la amplitud de deformación aumenta en incrementos de 25 $\mu\text{m}/\text{m}$ hasta llegar a la rotura del material (Figura 3.9). Por tanto, el número de ciclos y la amplitud de deformación están directamente relacionados.

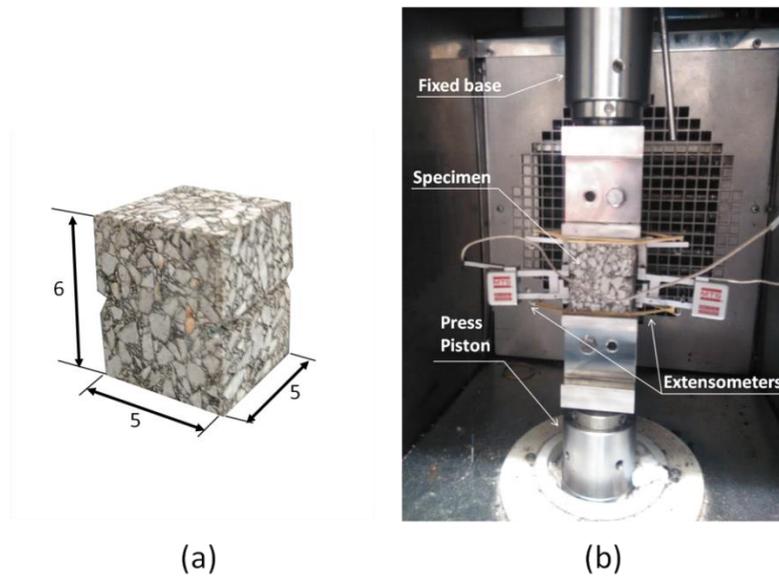


Figura 3.8. (a) Dimensiones de la probeta y (b) Probeta durante el ensayo EBADE [307].

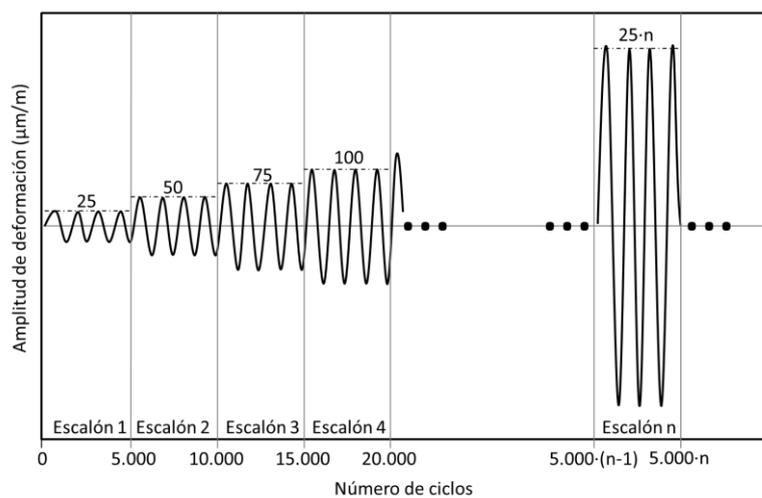


Figura 3.9. Esquema representativo del ensayo EBADE [308].

Los parámetros más importantes que pueden ser calculados durante el ensayo son el módulo,

$|E^*|$, y la Densidad de Energía Disipada, DED , durante cada ciclo. Usando la tensión máxima, σ_{max} , y la deformación máxima, ε_{max} , es posible obtener el valor del módulo mediante la ecuación 3.6:

$$\varepsilon = \varepsilon_{max} \sin(\omega t) \quad (3.4)$$

$$\sigma = \sigma_{max} \sin(\omega t + \delta) \quad (3.5)$$

$$|E^*| = \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon_{max}} \quad (3.6)$$

donde la ecuaciones 3.4 y 3.5 representan la señal de entrada de la deformación y la señal de salida de la tensión, respectivamente, y δ es el desfase entre ambas señales.

Debido al desfase entre tensión y deformación, la gráfica deformación-tensión de cada ciclo tiene forma de elipse (Figura 3.10). La DED corresponde al área de esta elipse. Para calcular el área a partir de los datos del ensayo se usa la fórmula de Gauss, ecuación 3.7.

$$DED = \frac{1}{2} |(\sigma_1 \varepsilon_2 + \sigma_2 \varepsilon_3 + \dots + \sigma_{n-1} \varepsilon_n + \sigma_n \varepsilon_1) - (\sigma_2 \varepsilon_1 + \sigma_3 \varepsilon_2 + \dots + \sigma_n \varepsilon_{n-1} + \sigma_1 \varepsilon_n)| \quad (3.7)$$

donde $\sigma_i \varepsilon_i$ son los n valores obtenidos para la tensión y la deformación durante cada ciclo en sentido horario o antihorario.

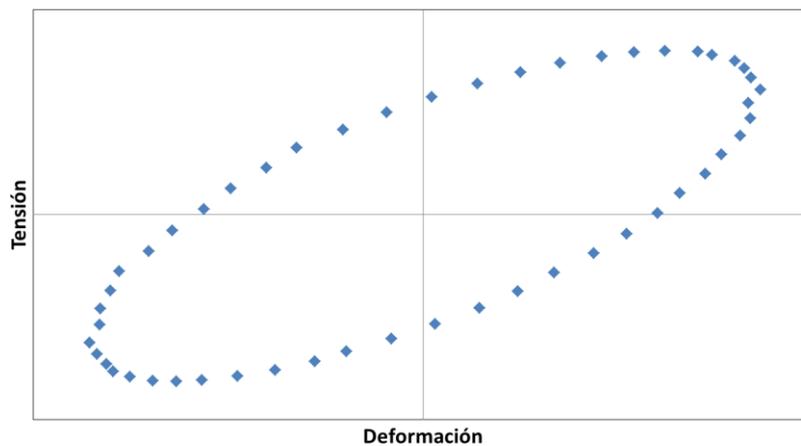


Figura 3.10. Elipse formada en la gráfica deformación-tensión.

La densidad de energía disipada acumulada se obtiene como la suma de todas las densidades de energía disipada, ecuación 3.8.

$$DED_c = \sum_{i=1}^N DED_i \quad (3.8)$$

siendo N el número total de ciclos aplicados.

Como ejemplo, la Figura 3.11 muestra la evolución de la DED con el número de ciclos para una mezcla a 20°C. La energía disipada aumenta con el nivel de deformación impuesto, hasta un cierto nivel de deformación a partir del cual disminuye, a la vez que disminuye rápidamente dentro de un mismo escalón de carga. El criterio de fallo a fatiga se establece como el escalón de deformación en el cual la energía disipada disminuye por debajo del 50% del valor máximo alcanzado durante el ensayo. El número de ciclos que corresponden a este paso es el valor “*N*” de la ecuación 3.8.

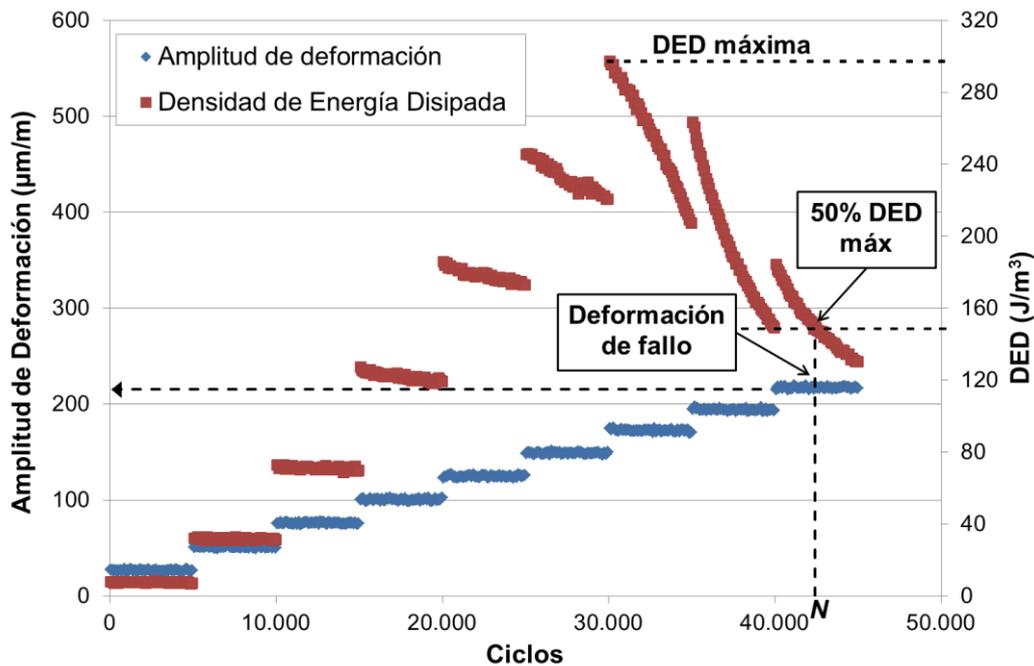


Figura 3.11. Evolución de la densidad de energía disipada con el número de ciclos en el ensayo EBADE a 20°C y 10 Hz.

Con el módulo inicial obtenido como la media en el primer escalón de carga y la deformación de fallo es posible caracterizar el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas. Cuanto mayor es el módulo inicial de la mezcla ensayada, el material se comporta de forma elástica hasta un nivel de deformaciones más elevado, pero su degradación se produce de forma más brusca. La deformación de fallo sería la que, aplicada a la mezcla, produciría su fallo en muy pocas aplicaciones de carga. Es por ello que, al igual que con el valor del módulo inicial, la mezcla con un valor mayor de deformación de fallo debería ser la que mejor comportamiento a fatiga muestre.

Al limitar el número ciclos en cada escalón de deformación a un valor fijo, para deformaciones tanto bajas como altas, el número de ciclos hasta el fin del ensayo se ve reducido sustancialmente.

El ensayo de barrido de deformaciones, EBADE, presenta las siguientes ventajas frente a otros ensayos de fatiga:

- Menor duración de los ensayos para evaluar la respuesta a fatiga de las mezclas asfálticas.
- Utilización de probetas prismáticas que permiten obtener fácilmente los parámetros característicos del material.
- Se puede realizar en un amplio rango de temperaturas.
- Permite simular el comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas condicionadas por las tensiones térmicas.
- Buena sensibilidad del procedimiento frente a las variables de la mezcla (composición) y condiciones de ensayo (temperatura).

La máquina de ensayo empleada en los ensayos Fénix y EBADE es una prensa hidráulica dinámica de la marca MTS. La célula de carga de esta máquina permite registrar cargas de hasta 100 kN, con una precisión cercana a 1 N. Así mismo, el actuador del pistón permite realizar desplazamientos de 30 micras con precisiones de alrededor de 1 micra. La prensa está equipada con una cámara termostática que permite controlar la temperatura durante la realización del ensayo con una precisión de 1°C. El sistema hidráulico de la prensa permite imponer señales cíclicas de entrada tanto a la carga, medida por la célula, como al desplazamiento del pistón, de hasta 30 Hz de frecuencia.

3.3. Ensayos de Barrido de tiempo

Los ensayos de barrido de tiempo son ensayos de fatiga clásicos en los que la deformación o la tensión se mantiene constante hasta que se produce el fallo total de la probeta (Figura 3.12).

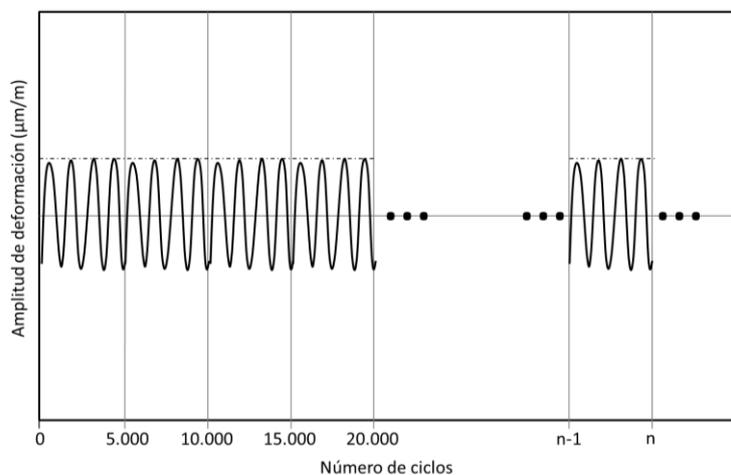


Figura 3.12. Esquema representativo de los ensayos de barrido de tiempo.

El objetivo de los ensayos de barrido de tiempo es determinar la ley de fatiga del material, para así poder relacionar el nivel de deformaciones o esfuerzos al que se ve sometida la mezcla

por la aplicación de una carga con el número de ciclos de carga que ésta puede soportar antes de llegar a fallar. Para ello, es necesario realizar varios ensayos a diferentes amplitudes de deformación o tensión, registrando el número de ciclos para los que se produce el fallo. Con ello se pretende estimar la vida útil de una capa asfáltica que forma parte de un firme.

En los siguientes subapartados se describen los dos ensayos de barrido de tiempo empleados durante el desarrollo de este trabajo.

3.3.1. Ensayo de tracción-compresión

El ensayo de tracción-compresión consiste en someter una probeta a esfuerzos de tracción y compresión sujetándola a los pistones de la prensa de ensayo mediante unas placas de acero adheridas a los extremos de la probeta. En este trabajo, tanto la geometría de la probeta como la configuración del ensayo, han sido similares a las descritas en el ensayo EBADE, lo cual facilita la comparación de resultados entre el ensayo de barrido de deformaciones y el de barrido de tiempo.

En este caso, la deformación aplicada a la probeta se mantiene constante durante el ensayo. El desplazamiento vertical del pistón puede ser controlado directamente por cualquiera de los dos extensómetros situados en cada uno de los lados donde se sitúa la zona de fallo que habrá sido inducida previamente; así se garantiza que la deformación aplicada a la muestra es constante durante todo el ensayo.

La célula de carga de la máquina adquiere datos cada cierto intervalo de tiempo (en este trabajo cada 500 ciclos), obteniendo finalmente la curva de degradación del módulo de la muestra con el número de ciclos para una deformación dada. Este proceso se repite para las diferentes deformaciones consideradas, que en el caso de este trabajo coinciden con los escalones de deformación del ensayo EBADE realizado sobre la misma mezcla, y estableciendo un criterio de fallo, es posible obtener la ley de fatiga del material.

3.3.2. Ensayo de flexión en dos puntos

El ensayo de fatiga a flexión en dos puntos sobre probetas trapezoidales [253], realizado durante la estancia en la Universidad de Nottingham, es un ensayo cíclico que consiste en someter una probeta con forma trapezoidal a una amplitud de deformación constante.

Las dimensiones de la probeta son de 250 mm de alto, 25 mm de espesor y 56 mm de base superior por 25 mm de base inferior. El procedimiento de ensayo consiste en fijar la probeta por la base mayor y aplicar un desplazamiento senoidal de amplitud constante en la parte

superior, de tal forma que registre la fuerza que soporta la muestra durante el ensayo (Figura 3.13).



Figura 3.13. Probetas trapezoidales durante el ensayo de flexión en dos puntos.

En el ciclo 100 se registra el módulo del material, que es considerado como el módulo inicial. Durante el ensayo se monitoriza la evolución de este parámetro, y el ensayo finaliza cuando el valor del módulo se reduce al 50% del módulo inicial, siendo éste el criterio de fallo del ensayo. El número de ciclos necesario para que esto ocurra se registra junto con la amplitud de deformación aplicada. La carga aplicada se mide por una célula de carga situada entre la probeta y el actuador en el extremo superior de la muestra en voladizo, mientras que la deflexión en el extremo de la probeta se mide mediante un transformador diferencial de variación lineal (LVDT).

Además de los valores de módulo y número de ciclos, se obtienen valores de tensión, módulo complejo y ángulo de fase cada 100 ciclos. A partir de estos parámetros es posible determinar la energía disipada en cada ciclo [309]:

$$W_i = \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin(\varphi_i) \quad (3.9)$$

donde W_i es la energía disipada en el ciclo i , σ_i es el nivel de tensión en el ciclo i , ε_i es el nivel de deformación en el ciclo i , y φ_i es el ángulo de fase en el ciclo i .

Para realizar el ensayo a flexión sobre probetas trapezoidales se ha usado un equipo de la marca Cooper en el cual es posible ensayar simultáneamente dos muestras trapezoidales. Este dispositivo permite ejecutar dos tipos de ensayos: uno de medida del módulo complejo (determinar el módulo de rigidez a diversas frecuencias y temperaturas) y otro de fatiga. En el ensayo a fatiga, las muestras son sometidas a una amplitud de deformación constante, a una frecuencia y temperatura seleccionadas, hasta que el módulo de rigidez baja a un nivel seleccionable por el usuario (por lo general, el 50% de su valor inicial). El instigador es un vástago vibrante electrodinámico que permite aplicar una carga sinusoidal de frecuencia y

amplitud dadas en la parte superior de la probeta trapezoidal. Esta máquina permite frecuencias de 1 a 30 Hz. El conjunto del sistema (probeta e instigador) se encuentran en un recinto termo-regulado que permite mantener la temperatura constante.

3.4. Ensayo de Tracción Indirecta

Para el estudio del efecto del envejecimiento mediante UV, así como el estudio del efecto de ligantes modificados con nanomateriales sobre el envejecimiento y el daño por humedad en la resistencia de la mezcla, realizado en el Instituto Superior Técnico de la Universidad de Lisboa, se ha utilizado el ensayo de tracción indirecta definido en la norma EN 12697-23:2003 [310]. Mediante este ensayo es posible calcular la resistencia a tracción indirecta de las mezclas, definida como el esfuerzo de tracción máximo calculado en función de la carga máxima aplicada cuando se produce la rotura, y las dimensiones de la probeta, ecuación 3.10.

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} \quad (3.10)$$

donde *ITS* es la resistencia a tracción indirecta (GPa), *P* es la carga máxima (kN), *D* es el diámetro de la probeta (mm) y *H* es la altura de la probeta (mm).

La rigidez de la mezcla puede ser analizada a partir de la pendiente de subida de la curva carga-desplazamiento obtenida a partir del ensayo. Así, al igual que para el ensayo Fénix, se define el índice de rigidez a la tracción mediante la ecuación 3.1.

4. Planificación de los ensayos

La Figura 3.14 muestra de forma esquemática el proceso seguido en la realización de los ensayos. El flujo de la misma se ha agrupado en tres bloques: materiales, acondicionamiento y ensayos, marcando en distintos colores las tipologías de ensayo consideradas. En primer lugar, se ha preparado la mezcla en función del tipo de ligante y de árido. Una vez preparada, el plan de ensayos se divide en dos partes:

- La primera parte corresponde a los ensayos realizados sobre probetas compactadas inmediatamente después de fabricar la mezcla. Un grupo de estas probetas se ha ensayado sin ningún tipo de acondicionamiento previo y el otro grupo ha sido sometido a un periodo de inmersión en agua (daño por humedad).
- La segunda parte corresponde a los ensayos realizados sobre probetas de mezcla previamente envejecida. Para ello, una vez fabricada, la mezcla se ha mantenido suelta en

estufa durante un periodo de tiempo, transcurrido el cual, se han compactado y fabricado las probetas. La mitad de estas probetas se han ensayado sin ningún acondicionamiento previo, mientras que la otra mitad han sido sometidas a la acción del agua antes de ser ensayadas.

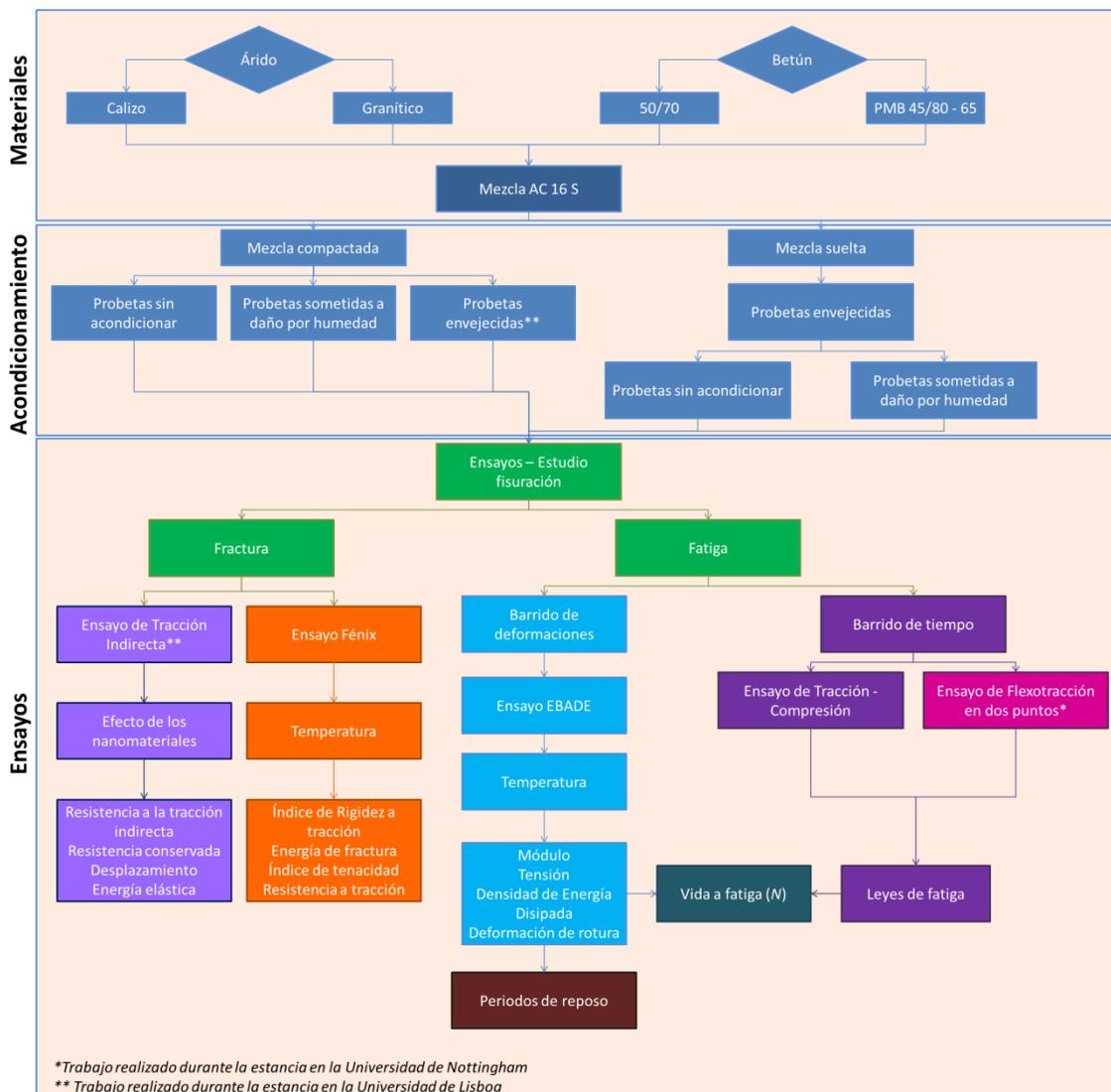


Figura 3.14. Diagrama de flujo del plan experimental.

Los cuatro grupos de probetas descritos han sido compactados usando la metodología Marshall (compactación por impacto) y han sido ensayados mediante el ensayo Fénix, para estudiar su resistencia a fractura, y mediante el ensayo EBADE, con el cual se ha estudiado la resistencia a fatiga de cada grupo de probetas.

Otra de las variables que se ha tenido en cuenta en este trabajo ha sido la temperatura de ensayo. Se han establecido como temperaturas de ensayo 20, 5 y -5°C.

A continuación se detallan las variables del ensayo para el estudio del efecto del envejecimiento y del daño por humedad en la resistencia a fractura de las mezclas (ensayo

Fénix):

- Mezcla: AC16S
- Árido: calizo, granítico.
- Ligante: 50/70, PMB 45/80-65.
- Contenido de ligante: 4,5% sobre mezcla.
- Acondicionamiento: sin acondicionar, daño por humedad, envejecimiento y combinación de envejecimiento y daño por humedad.
- Temperatura de ensayo: 20, 5 y -5°C.
- Velocidad de desplazamiento: 1mm/min

En el caso del estudio del efecto del envejecimiento y del daño por humedad en la resistencia a fatiga de las mezclas, se han establecido las siguientes variables del ensayo:

- Mezcla: AC16S
- Árido: calizo, granítico.
- Ligante: 50/70, PMB 45/80-65.
- Contenido de ligante: 4,5% sobre mezcla.
- Acondicionamiento: sin acondicionar, daño por humedad, envejecimiento y combinación de envejecimiento y daño por humedad.
- Temperatura de ensayo: 20, 5 y -5°C.
- Escalón de desplazamiento: $2,5 \cdot 10^{-5}$ y 5.000 ciclos.
- Frecuencia del ensayo: 10 Hz.

Para ambos ensayos (Fénix y EBADE) se han realizado al menos tres réplicas por cada condición estudiada (temperatura, ligante, árido y acondicionamiento).

Para poder cuantificar el efecto que el envejecimiento y el daño por humedad de la mezcla producen sobre la vida del firme es necesario disponer de las clásicas leyes de fatiga que relacionan la deformación producida por la aplicación de una carga con el número de veces que se puede repetir esta carga hasta rotura. A partir de los resultados del ensayo EBADE se ha propuesto un método para estimar estas leyes a partir de dos niveles de deformación: la deformación de fallo y la deformación de no fallo. Para poder validar estas leyes ha sido necesario disponer de las leyes de fatiga obtenidas a partir de ensayos clásicos de barrido de tiempo realizados en tracción-compresión sobre la misma geometría de probeta. Estos son los ensayos de fatiga clásicos en los que la amplitud de deformación se mantiene constante en el tiempo (a lo largo de los ciclos) hasta que se produce el fallo total de la probeta. Mediante la realización de este tipo de ensayos se puede obtener la ley de fatiga del material. Para ello, se han realizado varios ensayos a diferentes amplitudes de deformación, las cuales coinciden con

algunos de los escalones de deformación del ensayo EBADE para la misma mezcla, y se registra el número de ciclos hasta fallo. Las variables del ensayo han sido las siguientes:

- Mezcla: AC16S
- Árido: calizo.
- Ligante: 50/70, PMB 45/80-65.
- Contenido de ligante: 4,5% sobre mezcla.
- Temperatura de ensayo: 20°C.
- Amplitud de desplazamiento constante ligante 50/70: $7,5 \cdot 10^{-5}$; 10^{-4} ; $1,25 \cdot 10^{-4}$; $1,75 \cdot 10^{-4}$ y $2,25 \cdot 10^{-4}$.
- Amplitud de desplazamiento constante ligante PMB 45/80-65: $1,75 \cdot 10^{-4}$; $2,25 \cdot 10^{-4}$; $2,75 \cdot 10^{-4}$; $3,50 \cdot 10^{-4}$ y $4,25 \cdot 10^{-4}$.
- Frecuencia de ensayo: 10 Hz.

En este caso, se han realizado, al menos, dos ensayos por cada amplitud de deformación.

Durante la estancia realizada en la Universidad de Nottingham se ha estudiado el efecto del envejecimiento en la fatiga de las mezclas asfálticas mediante el ensayo de flexión en dos puntos sobre probetas trapezoidales. La Figura 3.15 muestra un diagrama del proceso seguido durante la realización de este estudio. Las probetas para la realización de este ensayo han sido obtenidas a partir del serrado de placas de mezcla bituminosa compactadas con rodillo, fabricando dos placas de mezcla bituminosa por cada condición estudiada. Los resultados obtenidos permiten analizar el comportamiento de la mezcla a partir de un ensayo de fatiga diferente, y compararlos con los obtenidos anteriormente. En este caso, las variables del ensayo han sido las siguientes:

- Árido: calizo (Tunstead).
- Ligante: 50/70, PMB 45/80-65.
- Contenido de ligante: 4,5%
- Acondicionamiento: sin acondicionar y envejecimiento.
- Temperatura de ensayo: 20°C.
- Amplitud de desplazamiento ligante 50/70 (no acondicionadas): $1,25 \cdot 10^{-4}$; $1,75 \cdot 10^{-4}$; $2,25 \cdot 10^{-4}$; $2,75 \cdot 10^{-4}$ y $3,50 \cdot 10^{-4}$.
- Amplitud de desplazamiento ligante 50/70 (envejecidas): $1,25 \cdot 10^{-4}$; $1,75 \cdot 10^{-4}$; $2 \cdot 10^{-4}$; $2,25 \cdot 10^{-4}$ y $2,75 \cdot 10^{-4}$.
- Amplitud de desplazamiento ligante PMB 45/80-65 (no acondicionadas): $2,50 \cdot 10^{-4}$; $2,75 \cdot 10^{-4}$; $3,50 \cdot 10^{-4}$; $3,75 \cdot 10^{-4}$ y $4,25 \cdot 10^{-4}$.
- Amplitud de desplazamiento ligante PMB 45/80-65 (envejecidas): $2,25 \cdot 10^{-4}$; $2,50 \cdot 10^{-4}$; $2,75 \cdot 10^{-4}$; $3 \cdot 10^{-4}$ y $3,50 \cdot 10^{-4}$.

➤ Frecuencia de ensayo: 10 Hz.

Se han realizado al menos dos ensayos para cada amplitud de deformación considerada.

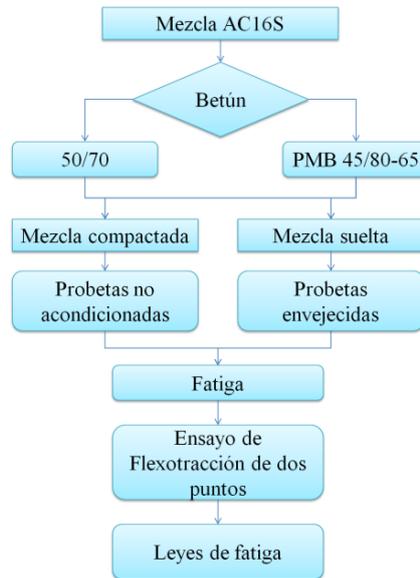


Figura 3.15. Diagrama de flujo del plan experimental seguido durante la estancia en la Universidad de Nottingham.

Siguiendo con el estudio del comportamiento a fatiga de las mezclas, se ha analizado la posibilidad de que las mezclas no estén experimentando daño irreversible en los primeros niveles de amplitud de deformación, sino que la reducción del módulo complejo sea debida a efectos no lineales (tixotropía), y por tanto, ser reversible al cesar la sollicitación. Por ello, con el objeto de analizar el grado de recuperación de las propiedades mecánicas de la mezcla cuando disminuye o cesa la sollicitación, a partir del ensayo cíclico de tensión-compresión, se ha diseñado el siguiente plan de ensayos (Figura 3.16):

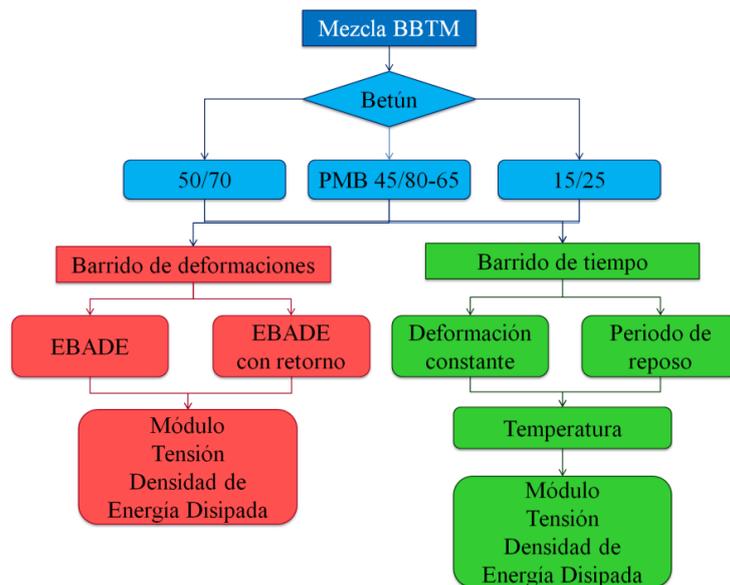


Figura 3.16. Diagrama de flujo del plan experimental seguido en el estudio de la tixotropía.

➤ Se realiza el ensayo EBADE sobre las probetas de mezcla, en el cual la amplitud de deformación va aumentando progresivamente para cada escalón de carga. Sin embargo, al finalizar cada escalón de carga, la deformación se reduce hasta el valor correspondiente al primer escalón de carga, es decir, $25 \mu\text{m/m}$ (Figura 3.17). Las variables del ensayo realizado son las siguientes:

- Mezcla: BBTM 11A.
- Árido: calizo.
- Ligante: 50/70, PMB 45/80-65, 15/25.
- Acondicionamiento: sin acondicionar y envejecimiento.
- Contenido de ligante: 5%.
- Temperatura de ensayo: 20, 5 y -5°C .
- Escalón de desplazamiento: $2,5 \cdot 10^{-5}$ y 5.000 ciclos.
- Amplitud de deformación inicial: $2,5 \cdot 10^{-5}$.
- Frecuencia de ensayo: 10 Hz.

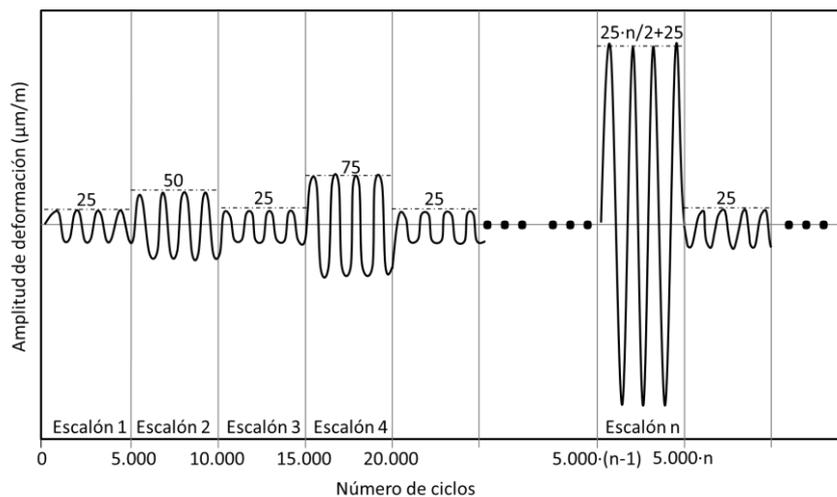


Figura 3.17. Esquema representativo del ensayo EBADE donde al finalizar cada escalón de carga la deformación vuelve a ser la correspondiente al primer escalón.

➤ Introducción de periodos de reposo en un ensayo de barrido de tiempo. Aplicación de sucesivas series de ciclos de carga con una amplitud de deformación constante, dejando pasar un periodo de tiempo entre cada serie de ciclos de carga (Figura 3.18). Las variables del ensayo realizado son las siguientes:

- Mezcla: BBTM 11A.
- Árido: calizo.
- Ligante: 50/70, PMB 45/80-65, 15/25.
- Acondicionamiento: sin acondicionar y envejecimiento.
- Contenido de ligante: 5%

- Temperatura de ensayo: 20, 5 y -5°C.
- Ciclos de carga: 200 ciclos.
- Periodo de reposo entre ciclos de carga: 10 min, 5 min, 1 h.
- Frecuencia de ensayo: 10 Hz.

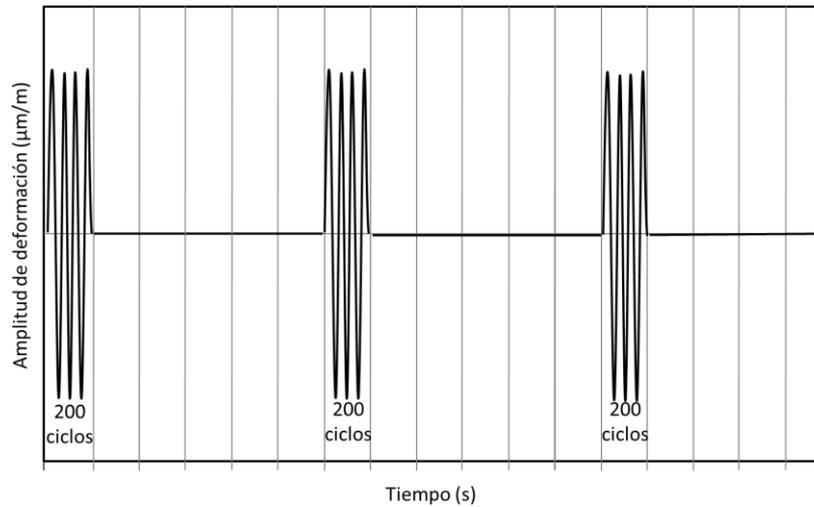


Figura 3.18. Esquema representativo del ensayo de barrido de tiempo introduciendo periodos de reposo de 10 min cada 200 ciclos de carga.

Por último, durante la estancia realizada en la Universidad de Lisboa, se ha seguido el plan de ensayos esquematizado en la Figura 3.19. El trabajo se realiza sobre un mismo tipo de mezcla bituminosa, fabricada con tres tipos de ligantes: betún convencional no modificado de referencia, betún modificado con nanoarcilla y betún modificado con nanopartículas de hierro. Una vez las probetas de mezcla han sido fabricadas, el plan de ensayos se divide en tres bloques:

- El primer bloque corresponde a probetas de mezcla no envejecida.
- El segundo bloque de probetas se ha sometido a envejecimiento mediante el procedimiento TEAGE.
- El tercer y último bloque de probetas ha sido envejecido mediante el protocolo de envejecimiento LTOA (*Long Term Oven Ageing*).

La mitad de las probetas de cada bloque se someten a daño por humedad, ensayándolas todas a tracción indirecta. Las variables del ensayo a realizar son las siguientes:

- Mezcla: AC14.
- Árido: granítico.
- Fíller: calizo
- Ligante: 35/50, 35/50 modificado con nanoarcilla, 35/50 modificado con nanopartículas

de hierro.

- Contenido de nanopartículas: 4% sobre ligante.
- Contenido de ligante: 4,5% sobre mezcla.
- Acondicionamiento: sin acondicionar, daño por humedad, envejecimiento y combinación de envejecimiento y daño por humedad.
- Temperatura de ensayo: 15°C.

Se han realizado al menos cuatro ensayos por cada condición estudiada.

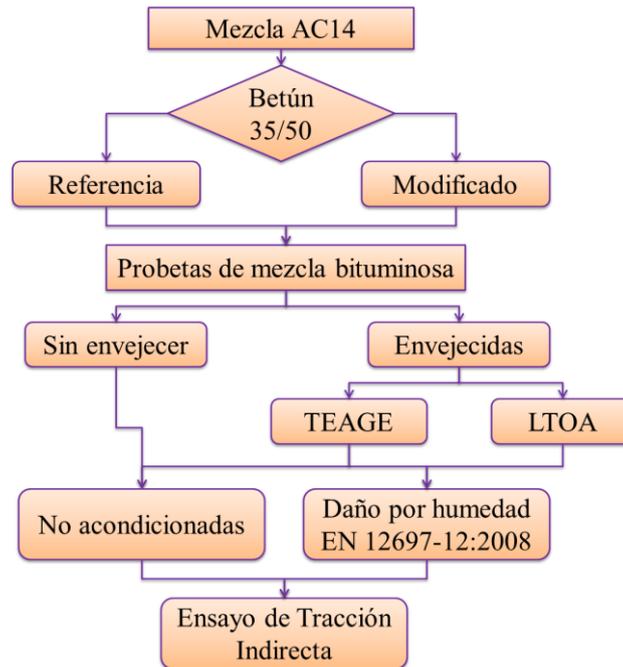


Figura 3.19. Diagrama de flujo del plan experimental seguido durante la estancia en la Universidad de Lisboa.

Capítulo 4.

Resultados

En este capítulo se presentan y analizan el conjunto de resultados obtenidos a lo largo del desarrollo de esta tesis.

En primer lugar, se presentan los resultados del estudio del efecto del envejecimiento y de la acción del agua en la resistencia a la fisuración de una mezcla asfáltica tipo AC16S, evaluando tanto el efecto de cada uno de estos factores de forma independiente, como el efecto combinado de ambos. La resistencia a la fisuración se ha analizado desde dos puntos de vista, el de la fractura y el de la fatiga de la mezcla, evaluando en ambos casos el efecto del tipo de betún, el tipo de árido y la temperatura de ensayo.

En segundo lugar, se presenta un apartado sobre la determinación de las leyes de fatiga. Para ello, se muestran y discuten los resultados obtenidos en los ensayos de barrido de deformaciones, proporcionándose una metodología para estimar las leyes de fatiga para cada tipo de mezcla estudiada a partir de estos resultados. Además, se han llevado a cabo ensayos de barrido de tiempo en tensión-compresión con la misma geometría de probeta, a partir de los cuales se obtienen las leyes de fatiga clásicas, con el objetivo de validar las leyes obtenidas con el ensayo de barrido de deformaciones y, por lo tanto, la metodología propuesta. Por último, se muestran los resultados obtenidos mediante el ensayo de flexotracción a dos puntos realizado en la Universidad de Nottingham durante la estancia predoctoral realizada por la autora. Las leyes de fatiga obtenidas en los tres casos son comparadas.

En este capítulo también se incluye un apartado donde se muestran los resultados obtenidos en el trabajo realizado en el Instituto Superior Técnico de la Universidad de Lisboa, donde se ha estudiado el efecto de la nanoarcilla y las nanopartículas de hierro, como modificadores del ligante, en la resistencia al envejecimiento y al daño por humedad de las mezclas asfálticas.

En último lugar, se presentan los resultados del estudio del efecto de la introducción de periodos de reposo en la respuesta a fatiga de las mezclas asfálticas, considerando factores como el tipo de ligante, la temperatura de ensayo o el estado de las mezclas (envejecidas o no).

1. Efecto del envejecimiento y de la acción del agua en la fisuración de la mezcla

En este apartado se ha procedido a analizar cómo afectan el envejecimiento y la acción del agua en la resistencia a la fisuración de la mezcla asfáltica. Este efecto en el mecanismo de fisuración se analizará, en primer lugar, a partir de la aplicación de una carga lenta monotónica a velocidad constante. Este primer enfoque se le ha denominado estudio de la fractura de la mezcla. En segundo lugar, se ha analizado el efecto de ambos factores (envejecimiento y daño por humedad) frente a la repetición de una carga cíclica, muy inferior a la resistencia máxima que la mezcla es capaz de soportar, estudiando así, la resistencia a fisuración por fatiga de la mezcla.

1.1. Fractura

Para el análisis del efecto del envejecimiento y del daño por humedad en la resistencia a la fisuración de la mezcla, se ha aplicado el ensayo Fénix.

1.1.1. Efecto del envejecimiento en la resistencia a la fisuración

En este apartado se analiza el efecto del envejecimiento en la resistencia a la fisuración de una mezcla asfáltica tipo AC16S, así como su efecto al variar el tipo de ligante y la temperatura de ensayo. Para ello, se han realizado ensayos sobre probetas fabricadas con un betún convencional (50/70) y con otro modificado con polímeros (PMB 45/80-65), envejecidas o no, a diferentes temperaturas de ensayo: 20, 5 y -5°C. La Tabla 4.1 muestra los valores promedio de densidad aparente y contenido de huecos de las probetas de mezcla bituminosa.

A modo de ejemplo, la Figura 4.1 recoge la variación de la carga aplicada a la mezcla fabricada con betún 50/70, no acondicionada y envejecida, durante el ensayo Fénix a una temperatura de 20°C. En la curva carga-desplazamiento, se observa que, cuando se aplica un modo de carga cuasi estático y monotónico, la carga va aumentando hasta llegar a un límite superior conocido como resistencia máxima a tracción del material, momento a partir del cual,

la carga comienza a decrecer hasta llegar a cero. Si se comparan las curvas de la mezcla no acondicionada y de la mezcla envejecida se pone de manifiesto el efecto del envejecimiento en el comportamiento de la mezcla. Al envejecer la mezcla, la pendiente de la curva aumenta, lo cual significa que aumenta su rigidez. Igualmente, la carga máxima que la mezcla es capaz de soportar antes de la rotura aumenta por efecto del endurecimiento del ligante asociado al envejecimiento. Por último, en la gráfica se observa que el valor del desplazamiento desde que la curva alcanza la carga máxima hasta que se reduce a la mitad disminuye al envejecer la mezcla, lo que quiere decir que la mezcla ha perdido ductilidad, comportándose de forma más frágil. El efecto del envejecimiento en la mezcla fabricada con betún PMB 45/80-65 es similar.

Tabla 4.1. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de probetas de mezcla AC16S fabricadas con árido calizo, no acondicionadas y envejecidas.

Ligante	Acondicionamiento	Densidad aparente (g/cm ³)		Contenido de huecos (%)	
		Promedio	σ	Promedio	σ
50/70	No acondicionadas	2,439	0,006	2,2	0,3
	Envejecidas	2,429	0,010	2,6	0,4
PMB 45/80-65	No acondicionadas	2,450	0,007	1,8	0,3
	Envejecidas	2,423	0,009	2,6	0,4

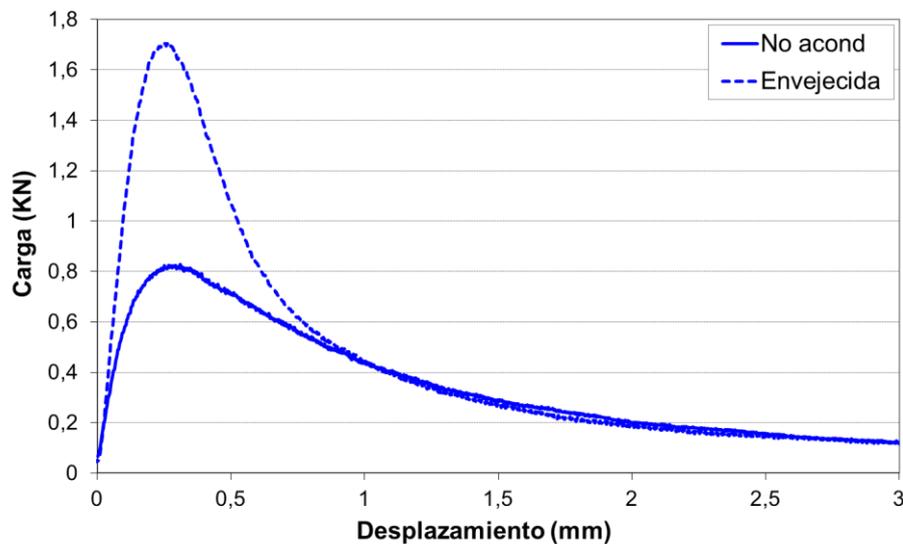


Figura 4.1. Curvas carga-desplazamiento de una probeta representativa de la mezcla no acondicionada (No acond) y de la mezcla envejecida durante el ensayo Fénix a 20°C. Mezcla fabricada con betún 50/70.

En la Tabla 4.2 y la Tabla 4.3 se presentan los resultados promedio de los principales parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix para la mezcla fabricada con betún convencional y modificado, respectivamente. Para una mejor visualización, la Figura 4.2 muestra los resultados de forma gráfica. Estos parámetros son la carga máxima (F_{max}), el índice de rigidez a la tracción (IRT), la energía de rotura (G_F), el índice de tenacidad (IT) y el desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico ($d_{0,5PM}$). En base a estos resultados, se puede considerar que el

valor del coeficiente de variación, C_v , se encuentra dentro de los valores de precisión exigidos en los ensayos de carreteras. A pesar de que existe algún valor puntual en que este coeficiente supera el 20%, la mayoría de los valores obtenidos se encuentran por debajo de este porcentaje.

Tabla 4.2. Resultados del ensayo Fénix para probetas no acondicionadas y probetas envejecidas. Betún 50/70.

Parámetro		20°C		5°C		-5°C	
		No acond	Envejecida	No acond	Envejecida	No acond	Envejecida
F_{max} (KN)	Media	0,7	1,7	2,8	3,1	3,0	3,0
	σ	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,2
	C_v	0,12	0,08	0,04	0,10	0,08	0,07
IRT (KN/mm)	Media	5,3	10,8	11,8	17,4	17,9	18,8
	σ	0,7	0,4	1,1	0,4	1,6	3,2
	C_v	0,13	0,04	0,09	0,02	0,09	0,17
G_F (J/m ²)	Media	394	502	783	312	360	272
	σ	32	37	102	39	26	50
	C_v	0,08	0,07	0,13	0,12	0,07	0,18
IT (J/mm)	Media	278	157	204	23	32	17
	σ	0	16	74	5	4	0
	C_v	0,00	0,01	0,36	0,20	0,14	0,01
$d_{0,5PM}$ (mm)	Media	1,2	0,6	0,6	0,3	0,3	0,2
	σ	0,2	0,06	0,1	0,0	0,0	0,0
	C_v	0,18	0,09	0,09	0,15	0,03	0,14

Tabla 4.3. Resultados del ensayo Fénix para probetas no acondicionadas y probetas envejecidas. Betún PMB 45/80-65.

Parámetro		20°C		5°C		-5°C	
		No acond	Envejecida	No acond	Envejecida	No acond	Envejecida
F_{max} (KN)	Media	0,7	1,7	2,3	3,0	4,3	3,2
	σ	0,0	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2
	C_v	0,04	0,08	0,06	0,09	0,04	0,08
IRT (KN/mm)	Media	4,0	9,6	12,0	15,4	18,4	20,4
	σ	0,3	0,65	1,6	0,9	0,6	0,9
	C_v	0,07	0,07	0,14	0,06	0,03	0,05
G_F (J/m ²)	Media	444	450	815	386	405	289
	σ	3	57	77	44	65	24
	C_v	0,01	0,13	0,09	0,11	0,16	0,08
IT (J/mm)	Media	473	121	348	24	21	10
	σ	30	17	6,7	1,3	4,5	0,1
	C_v	0,06	0,14	0,02	0,06	0,22	0,01
$d_{0,5PM}$ (mm)	Media	1,5	0,6	0,7	0,3	0,3	0,2
	σ	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
	C_v	0,04	0,02	0,18	0,10	0,14	0,1

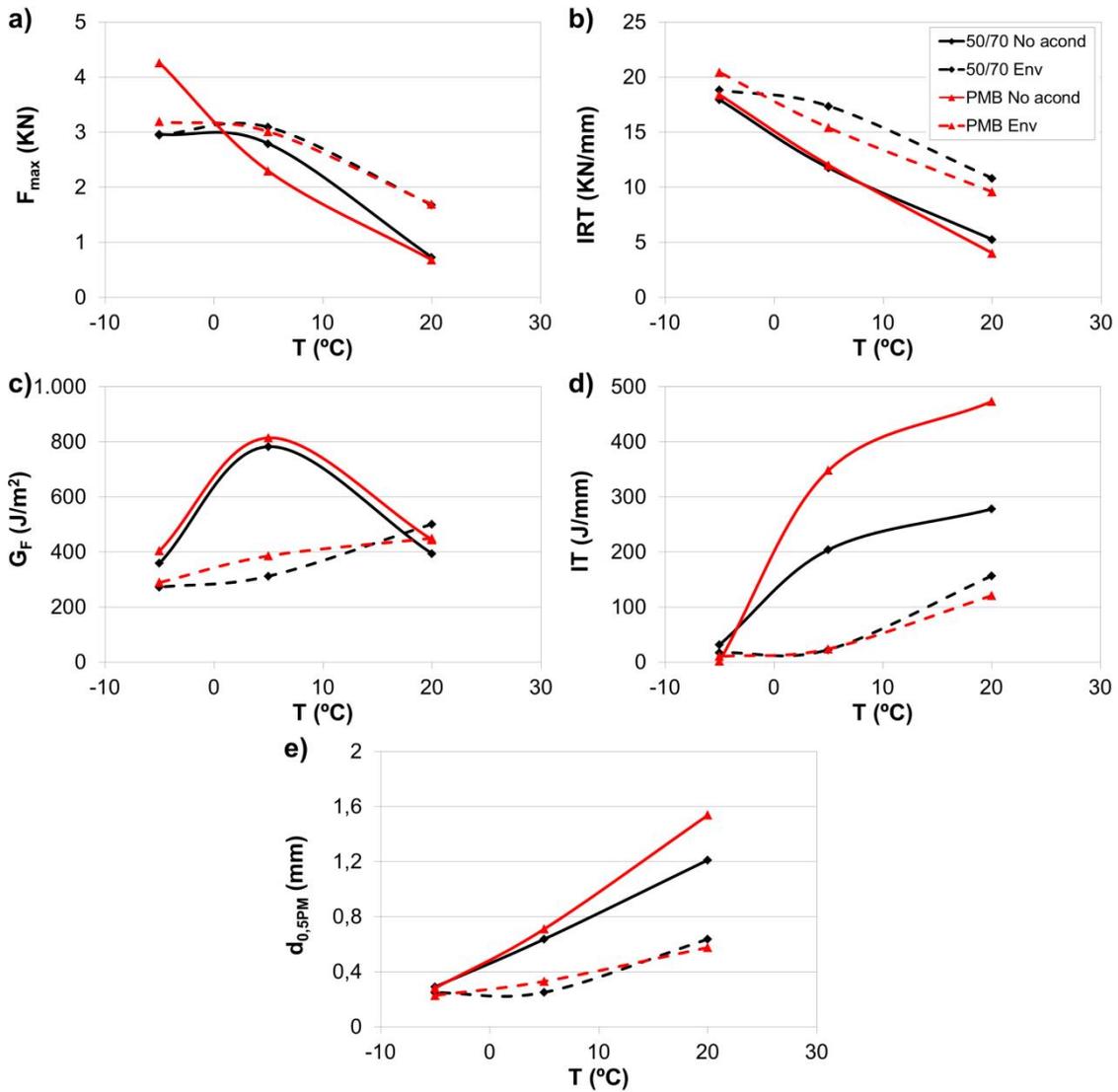


Figura 4.2. Resultados promedio de los principales parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix para las condiciones no acondicionadas (No acond) y envejecidas (Env): a) carga máxima (F_{max}), b) índice de rigidez a la tracción (IRT), c) energía de rotura (G_F), d) índice de tenacidad (IT) y e) desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico ($d_{0,5PM}$).

Para estudiar si existen variaciones significativas entre las mezclas no acondicionadas y las mezclas envejecidas ensayadas a temperaturas medias (20°C) se ha realizado un análisis de la varianza (ANOVA) de los parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix en las dos condiciones de estudio: mezcla no acondicionada y mezcla envejecida. Los resultados se muestran en la Tabla 4.4. Para que existan diferencias significativas entre la mezcla no acondicionada y la mezcla envejecida la probabilidad ha de ser menor de 0,05; estas diferencias serán mayores a medida que disminuye el valor de la probabilidad. Por tanto, se concluye que, en todos los casos a excepción de la energía de rotura, existen diferencias significativas entre la mezcla no acondicionada y la mezcla envejecida.

Tabla 4.4. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla no acondicionada y la mezcla envejecida ensayada a 20°C.

Betún	Parámetro	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad
50/70	F_{\max} (KN)	Intergrupo	1,35	1	1,35	99,909	5,63E-4
		Intragrupo	0,05	4	0,01		
		Total	1,41	5			
	IRT (KN/mm)	Intergrupo	46,4	1	46,4	137,941	3,01E-4
		Intragrupo	1,3	4	0,3		
		Total	47,8	5			
	G_F (J/m ²)	Intergrupo	14.008	1	14.008	12,249	0,039
		Intragrupo	3.431	3	1.144		
		Total	17.439	4			
	IT (J/mm)	Intergrupo	14.692	1	14.692	113,598	0,009
		Intragrupo	259	2	129		
		Total	14.951	3			
	$d_{0,5PM}$ (mm)	Intergrupo	0,50	1	0,50	20,396	0,011
		Intragrupo	0,10	4	0,02		
		Total	0,60	5			
PMB 45/80- 65	F_{\max} (KN)	Intergrupo	1,11	1	1,11	99,345	2,15E-3
		Intragrupo	0,03	3	0,01		
		Total	1,14	4			
	IRT (KN/mm)	Intergrupo	37,1	1	37,1	120,211	1,62E-3
		Intragrupo	0,9	3	0,3		
		Total	38,0	4			
	G_F (J/m ²)	Intergrupo	42	1	42	0,019	0,899
		Intragrupo	6.621	3	2.207		
		Total	6.663	4			
	IT (J/mm)	Intergrupo	149.054	1	149.054	298,851	4,22E-4
		Intragrupo	1.496	3	499		
		Total	150.550	4			
	$d_{0,5PM}$ (mm)	Intergrupo	1,11	1	1,11	978,265	7,18E-5
		Intragrupo	0,00	3	0,00		
		Total	1,11	4			

La razón por la que no se observan diferencias entre la energía de rotura de las mezclas no acondicionadas y envejecidas se debe a la forma de las curvas. La curva de la mezcla envejecida presenta una carga máxima elevada pero la curva postpico tiende a caer de forma más brusca que la de la mezcla no acondicionada, que presenta una carga máxima menor y una caída mucho más suave (Figura 4.3). Por lo tanto, aun siendo las curvas carga-desplazamiento totalmente diferentes, el área bajo las mismas es similar en ambos casos. Por este motivo, el estudio del efecto del envejecimiento en la fractura de la mezcla se va a centrar en especial en los parámetros de índice de rigidez a la tracción (IRT) y desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico ($d_{0,5PM}$).

Aunque, en general, por efecto del envejecimiento, las mezclas van a modificar su respuesta de forma tal que aumenta su rigidez y disminuye su tenacidad, el grado en el cual las mezclas se ven afectadas por el envejecimiento va a depender de distintos factores, como es el tipo de ligante usado en la fabricación de la mezcla o la temperatura de ensayo. Por este motivo, a

continuación se compara el comportamiento de la mezcla frente a envejecimiento en función del tipo de ligante y de la temperatura de ensayo.

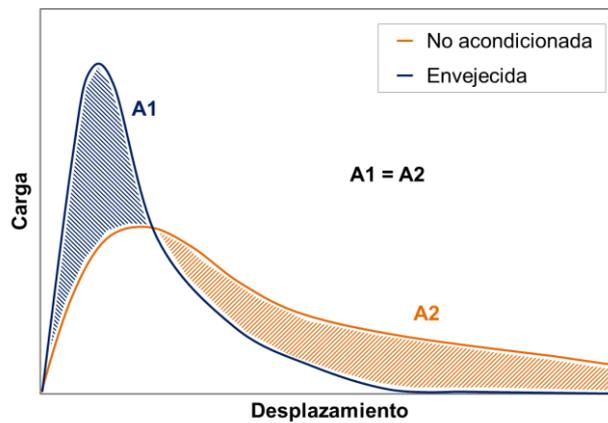


Figura 4.3. Representación esquemática de las curvas carga-desplazamiento en mezclas no acondicionadas y mezclas envejecidas.

1.1.1.1. Efecto del tipo de ligante y de la temperatura en el envejecimiento

La Figura 4.4 muestra los valores de desplazamiento al 50% de la carga máxima frente a los valores de índice de rigidez a la tracción de las dos mezclas seleccionadas, no acondicionadas y envejecidas, ensayadas a las temperaturas de 20, 5 y -5°C.

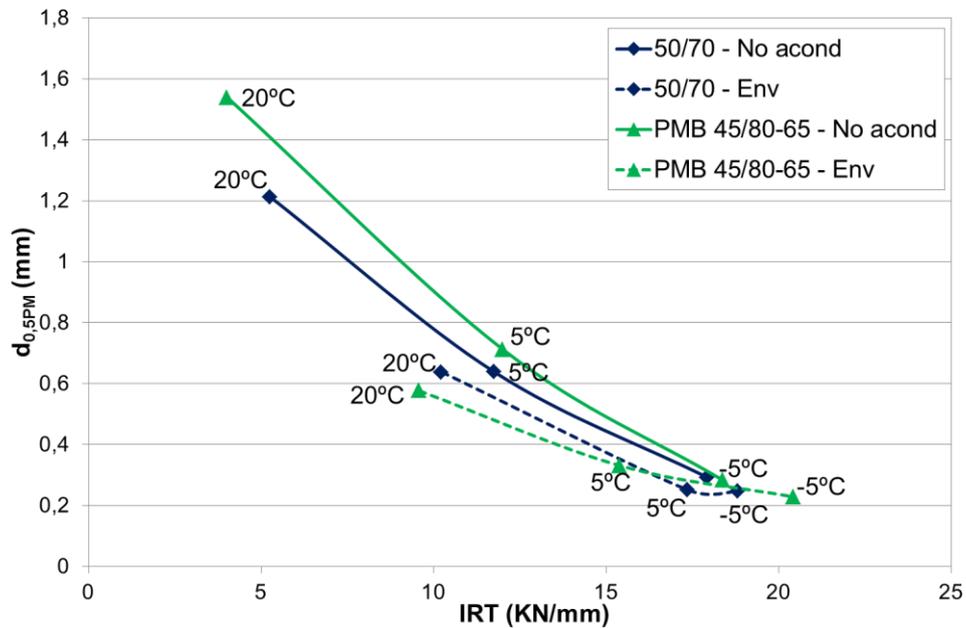


Figura 4.4. Valores de desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico ($d_{0,5PM}$) frente al índice de rigidez a la tracción (IRT) en el ensayo Fénix a 20, 5 y -5°C, para la mezcla no acondicionada (No acond) y envejecida (Env), fabricada con los betunes 50/70 y PMB 45/80-65.

Cuando las mezclas no se encuentran envejecidas, a temperaturas medias, el valor del desplazamiento en la mezcla fabricada con betún modificado es superior al de la mezcla fabricada con betún convencional, mientras que los valores de IRT son menores. Sin embargo, los valores de desplazamiento e IRT son similares para ambas mezclas cuando éstas se encuentran envejecidas. Por lo tanto, cuando las mezclas se envejecen, los valores obtenidos para la mezcla fabricada con betún modificado se reducen más que los de la mezcla fabricada con betún convencional, es decir, el efecto del envejecimiento es superior en la mezcla fabricada con betún modificado. A temperaturas bajas, el tipo de ligante tiene un mínimo efecto en la resistencia a la fisuración de la mezcla.

Analizando el efecto de la temperatura se observa que a medida que disminuye la temperatura aumenta la rigidez de la mezcla y al mismo tiempo se vuelve más frágil, ya que los valores de desplazamiento disminuyen al disminuir la temperatura. Este efecto es similar al producido por el envejecimiento. En la gráfica se observa que los valores de desplazamiento e IRT de la mezcla envejecida y ensayada a 20°C se encuentran próximos a los obtenidos cuando la mezcla no envejecida se ensaya a 5°C. Esto se observa igualmente entre la mezcla envejecida ensayada a 5°C y la mezcla no envejecida ensayada a -5°C. Por último, se observa que a temperaturas muy bajas, el efecto del envejecimiento es prácticamente nulo. Para estas temperaturas, la mezcla ha llegado a un valor máximo de rigidez, comportándose como un sólido elástico completamente rígido.

Para evaluar el efecto del envejecimiento en cada uno de los parámetros obtenidos en el ensayo Fénix, según el tipo de ligante, se ha calculado el índice de envejecimiento. Este índice se define como la relación entre una propiedad física medida sobre el material bituminoso envejecido y la misma propiedad medida en la mezcla antes de haber sido envejecida. La Figura 4.5 muestra los valores del índice de envejecimiento para los distintos parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix, para los dos tipos de ligante y las temperaturas de 20, 5 y -5°C. El efecto del envejecimiento es nulo cuando el valor del índice de envejecimiento es 1 y va creciendo a medida que se distancia de la unidad. De esta forma, se observa que a temperaturas medias (20°C), a excepción de la energía de rotura, la mezcla con betún modificado con polímeros se ve más afectada por el envejecimiento que la fabricada con betún convencional. Esto se debe principalmente a que, aunque después del envejecimiento la rigidez de la mezcla con betún modificado es menor que en la mezcla con betún convencional, la rigidez aumenta en mayor grado para la mezcla con betún modificado. Además, antes de envejecerse la mezcla con betún modificado es más dúctil que la fabricada con betún convencional, obteniendo valores de ductilidad similares después de envejecerse. Esta tendencia varía al disminuir la temperatura, donde por lo general el efecto del envejecimiento es similar o menor en la mezcla con betún modificado con respecto a la fabricada con betún convencional. Aquí se aprecia también cómo a

medida que baja la temperatura los valores del índice de rigidez para todos los parámetros, excepto la energía de rotura, tienden a acercarse a 1, es decir, el efecto del envejecimiento se hace menos notable al bajar la temperatura.

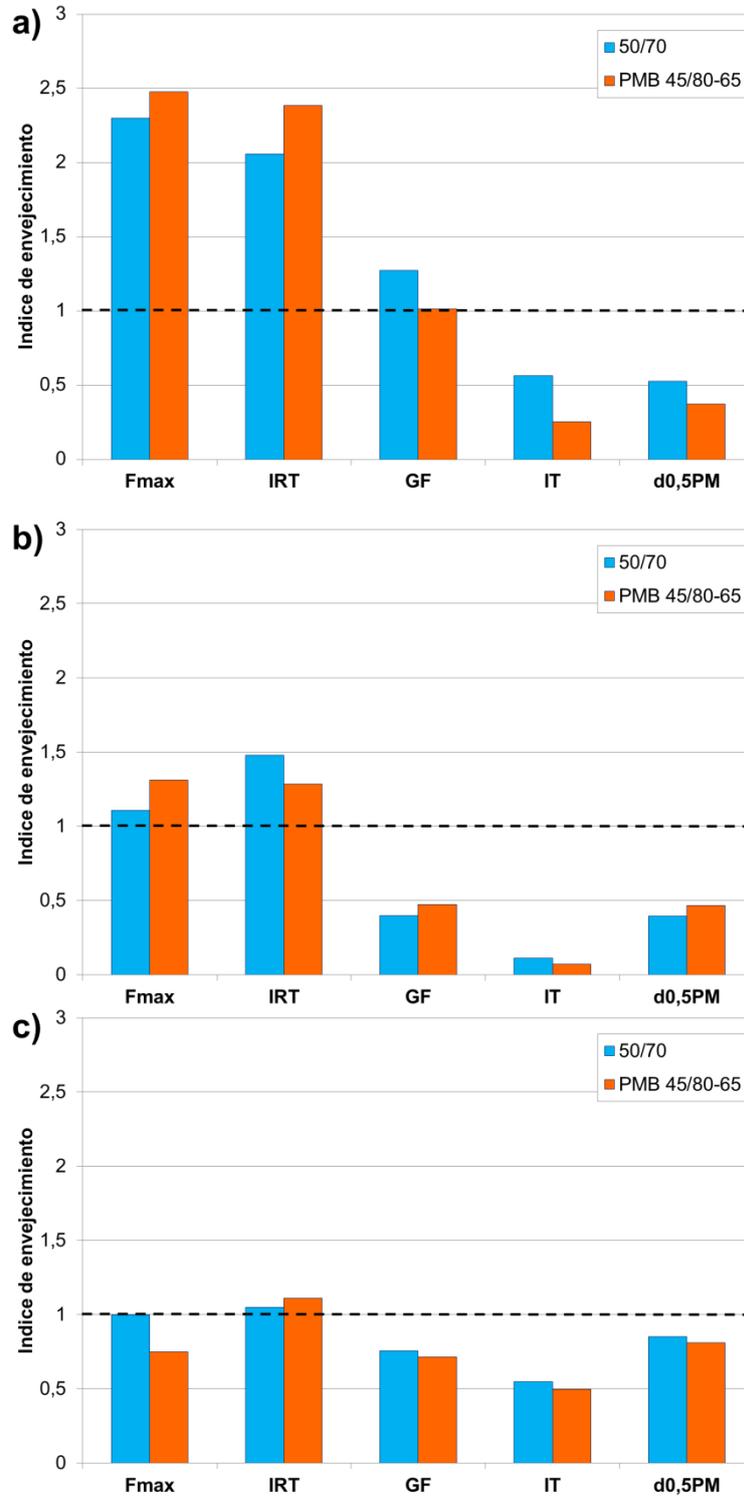


Figura 4.5. Valores de índice de envejecimiento para los distintos parámetros del ensayo Fénix. a) 20°C, b) 5°C y c) - 5°C. Mezcla fabricada con los betunes 50/70 y PMB 45/80-65.

1.1.2. Efecto del daño por humedad en la resistencia a la fisuración

En este apartado se analiza el efecto de la acción del agua en la resistencia a la fisuración de la mezcla tipo AC16S, al variar el tipo de ligante y la temperatura de ensayo. Para ello, probetas de mezcla fabricadas con un betún convencional (50/70) y un betún modificado con polímeros (PMB 45/80-65), sometidas o no a la acción del agua, han sido ensayadas mediante Fénix a diferentes temperaturas: 20, 5 y -5°C. La Tabla 4.5 muestra los valores promedio de densidad aparente y contenido de huecos de las probetas de mezcla bituminosa que han sido sometidas a daño por humedad.

Tabla 4.5. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de las probetas de mezcla AC16S para ser sometidas a daño por humedad.

Ligante	Densidad aparente (g/cm ³)		Contenido de huecos (%)	
	Promedio	σ	Promedio	σ
50/70	2,441	0,007	2,2	0,3
PMB 45/80-65	2,450	0,004	1,8	0,2

A modo de ejemplo, la Figura 4.6 muestra las curvas carga-desplazamiento de una probeta representativa de la mezcla fabricada con betún convencional, para las dos condiciones de estudio, ambas ensayadas a una temperatura de 20°C. Este ejemplo pone de manifiesto las mínimas diferencias existentes entre los resultados antes y después de acondicionar la mezcla.

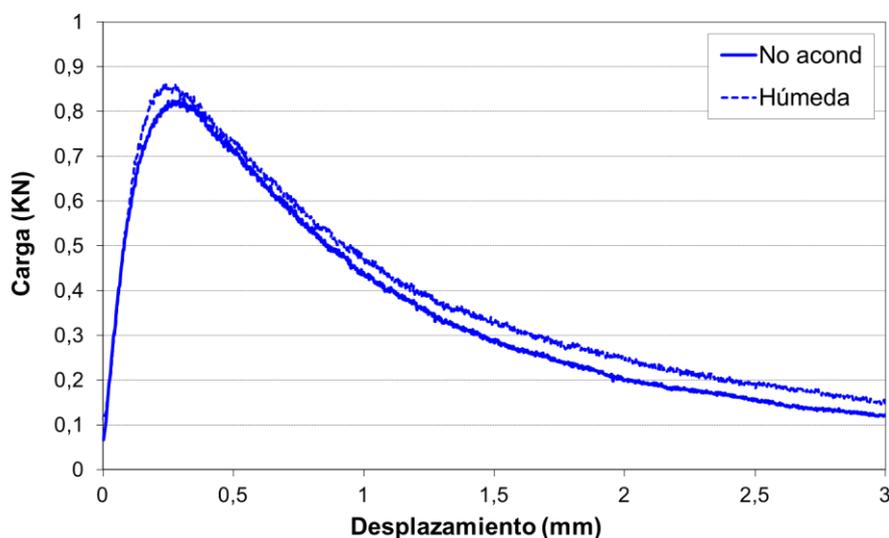


Figura 4.6. Curvas carga-desplazamiento de una probeta representativa fabricada con betún 50/70, no acondicionada (No acond) y sometida a daño por humedad (Húmeda), durante el ensayo Fénix a 20°C.

En la Tabla 4.6 y la Tabla 4.7 se presentan los resultados promedio de los principales parámetros del ensayo Fénix para la mezcla fabricada betún convencional y modificado, respectivamente. En ambas tablas se muestran los resultados de probetas no acondicionadas y

probetas sometidas a daño por humedad, para las distintas temperaturas de ensayo consideradas en este trabajo. Para una mejor visualización, la Figura 4.7 muestra los resultados de forma gráfica.

Tabla 4.6. Resultados del ensayo Fénix para probetas no acondicionadas (No acond) y probetas sometidas a daño por humedad (Húmedas). Mezcla fabricada con betún 50/70.

Parámetro	20°C		5°C		-5°C		
	No acond	Húmedas	No acond	Húmedas	No acond	Húmedas	
F_{max} (KN)	Media	0,7	0,8	2,8	2,9	3,0	3,0
	σ	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
	Cv	0,12	0,09	0,04	0,04	0,08	0,03
IRT (KN/mm)	Media	5,3	5,3	11,8	13,6	17,9	15,9
	σ	0,7	0,8	1,1	0,6	1,6	0,5
	Cv	0,13	0,16	0,09	0,04	0,09	0,03
G_F (J/m ²)	Media	394	468	783	814	360	327
	σ	32	125	102	64	26	11
	Cv	0,08	0,27	0,13	0,08	0,07	0,03
IT (J/mm)	Media	278	378	204	217	32	25
	σ	0	26	74	10	4	1
	Cv	0,00	0,07	0,36	0,04	0,14	0,06
$d_{0,5PM}$ (mm)	Media	1,2	1,3	0,6	0,6	0,3	0,3
	σ	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0
	Cv	0,18	0,14	0,09	0,12	0,03	0,01

Tabla 4.7. Resultados del ensayo Fénix para probetas no acondicionadas (No acond) y probetas sometidas a daño por humedad (Húmedas). Mezcla fabricada con betún PMB 45/80-65.

Parámetro	20°C		5°C		-5°C		
	No acond	Húmedas	No acond	Húmedas	No acond	Húmedas	
F_{max} (KN)	Media	0,7	0,8	2,3	2,4	4,3	3,9
	σ	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
	Cv	0,13	0,04	0,06	0,05	0,04	0,01
IRT (KN/mm)	Media	4,0	5,0	12,0	12,3	18,4	17,2
	σ	0,3	0,2	1,6	0,6	0,6	3,2
	Cv	0,07	0,04	0,14	0,05	0,03	0,18
G_F (J/m ²)	Media	444	656	815	874	405	396
	σ	3	89	77	108	65	72
	Cv	0,01	0,14	0,09	0,12	0,16	0,18
IT (J/mm)	Media	473	822	348	369	21	8
	σ	30	188	7	138	4	1
	Cv	0,06	0,23	0,02	0,37	0,22	0,09
$d_{0,5PM}$ (mm)	Media	1,5	1,7	0,7	0,8	0,3	0,3
	σ	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0
	Cv	0,04	0,12	0,18	0,18	0,14	0,16

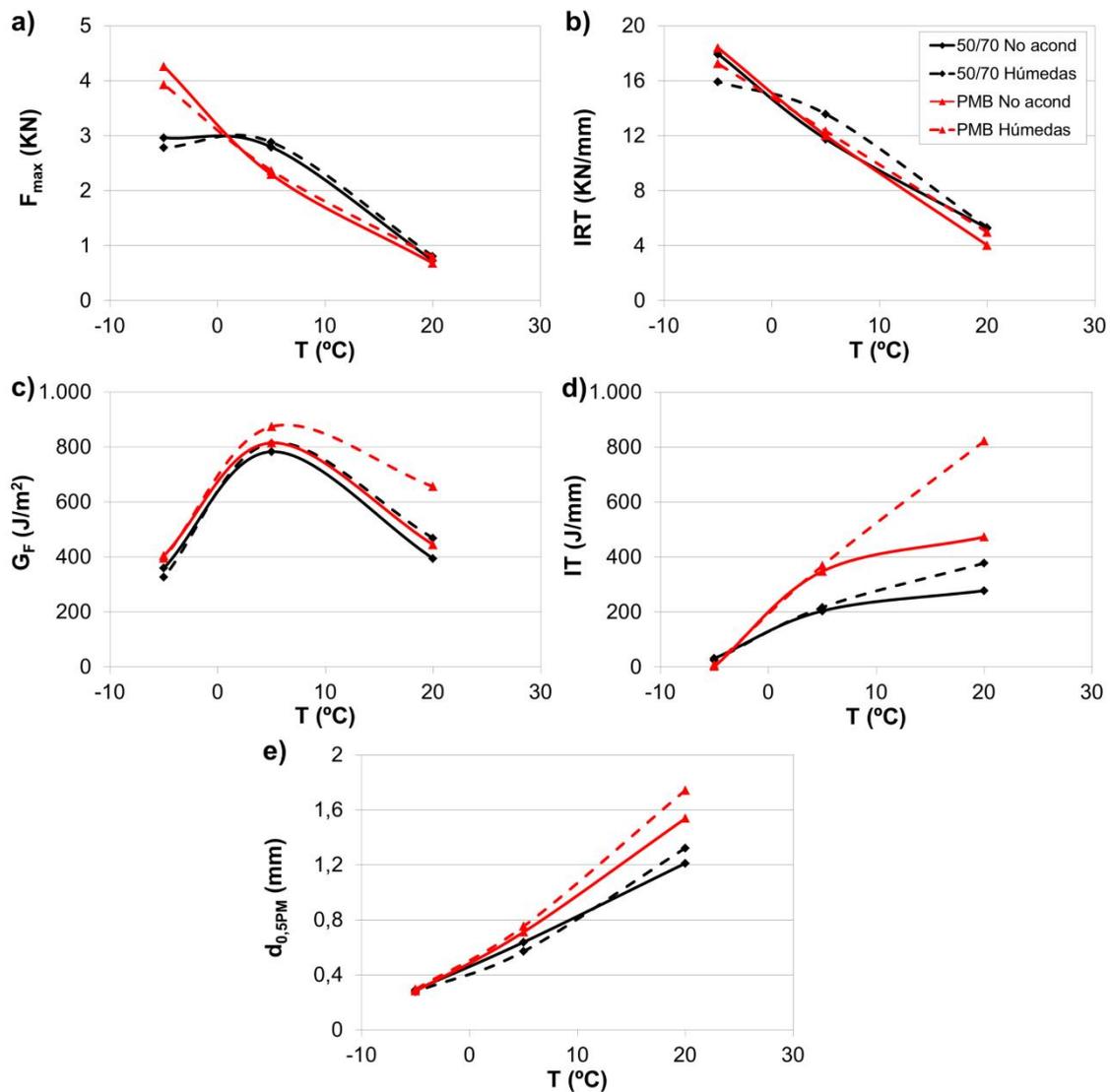


Figura 4.7. Resultados promedio de los principales parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix para las condiciones no acondicionado (No acond) y sometidas a daño por humedad (Inm): a) carga máxima (F_{max}), b) índice de rigidez a la tracción (IRT), c) energía de rotura (G_F), d) índice de tenacidad (IT) y e) desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico ($d_{0,5PM}$).

Para comprobar si las variaciones de los resultados del ensayo Fénix entre la mezcla no acondicionada y la mezcla sometida a daño por humedad son significativas se ha realizado un análisis de la varianza (ANOVA). Los resultados de este análisis se muestran en la Tabla 4.8 y la Tabla 4.9. A partir de estas tablas se demuestra que el daño por humedad no tiene efecto en el comportamiento frente a la fisuración para este tipo de mezcla, ya que en la mayoría de los casos se ha obtenido una probabilidad superior a 0,05, lo cual quiere decir que se acepta la hipótesis nula (no existen diferencias significativas entre mezclas no acondicionadas y mezclas sometidas a la acción del agua).

Tabla 4.8. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla no acondicionada y la mezcla sometida a daño por humedad. Mezcla con betún 50/70.

T (°C)	Parámetro	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad
20	F_{\max} (KN)	Intergrupo	0,01	1	0,01	1,081	0,375
		Intragrupo	0,02	3	0,01		
		Total	0,03	4			
	IRT (KN/mm)	Intergrupo	0,0	1	0,0	0,010	0,926
		Intragrupo	1,7	3	0,7		
		Total	1,7	4			
	G_F (J/m ²)	Intergrupo	8.310	1	8.310	1,001	0,374
		Intragrupo	33.221	4	8.305		
		Total	41.531	5			
	IT (J/mm)	Intergrupo	10.000	1	10.000	29,517	0,032
		Intragrupo	678	2	339		
		Total	10.678	3			
	$d_{0,5PM}$ (mm)	Intergrupo	0,02	1	0,02	0,469	0,531
		Intragrupo	0,16	4	0,04		
		Total	0,18	5			
5	F_{\max} (KN)	Intergrupo	0,01	1	0,01	1,712	0,340
		Intragrupo	0,04	4	0,01		
		Total	0,05	5			
	IRT (KN/mm)	Intergrupo	5,0	1	5,0	6,432	0,064
		Intragrupo	3,1	4	0,8		
		Total	8,0	5			
	G_F (J/m ²)	Intergrupo	1.425	1	1.425	0,196	0,681
		Intragrupo	29.133	4	7.283		
		Total	30.559	5			
	IT (J/mm)	Intergrupo	207	1	207	0,057	0,827
		Intragrupo	10.694	3	3.655		
		Total	11.171	4			
	$d_{0,5PM}$ (mm)	Intergrupo	0,01	1	0,01	1,717	0,260
		Intragrupo	0,02	4	0,00		
		Total	0,02	5			
-5	F_{\max} (KN)	Intergrupo	0,05	1	0,05	1,570	0,278
		Intragrupo	0,13	4	0,03		
		Total	0,17	5			
	IRT (KN/mm)	Intergrupo	6,1	1	6,1	4,205	0,110
		Intragrupo	5,8	4	1,5		
		Total	11,9	5			
	G_F (J/m ²)	Intergrupo	1.624	1	1.624	3,987	0,117
		Intragrupo	1.329	4	407		
		Total	3.253	5			
	IT (J/mm)	Intergrupo	65	1	65	6,028	0,070
		Intragrupo	43	4	11		
		Total	108	5			
	$d_{0,5PM}$ (mm)	Intergrupo	2,4E-4	1	2,4E-4	5,346	0,082
		Intragrupo	1,8E-4	4	4,5E-5		
		Total	4,2E-4	5			

Tabla 4.9. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla no acondicionada y la mezcla sometida a daño por humedad. Mezcla con betún PMB 45/80-65.

T (°C)	Parámetro	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad
20	F_{max} (KN)	Intergrupo	0,02	1	0,02	4,607	0,098
		Intragrupo	0,02	4	0,00		
		Total	0,04	5			
	IRT (KN/mm)	Intergrupo	1,1	1	1,1	18,220	0,024
		Intragrupo	0,2	3	0,1		
		Total	1,3	4			
	G_F (J/m ²)	Intergrupo	53.578	1	53.578	10,075	0,051
		Intragrupo	15.954	3	5.318		
		Total	69.533	4			
	IT (J/mm)	Intergrupo	146.042	1	146.042	6,140	0,089
		Intragrupo	71.351	3	23.784		
		Total	217.393	4			
	d_{0,5PM} (mm)	Intergrupo	0,05	1	0,05	1,791	0,273
		Intragrupo	0,09	3	0,03		
		Total	0,14	4			
5	F_{max} (KN)	Intergrupo	0,01	1	0,01	0,393	0,565
		Intragrupo	0,08	4	0,02		
		Total	0,08	5			
	IRT (KN/mm)	Intergrupo	0,2	1	0,2	0,106	0,761
		Intragrupo	6,0	4	1,5		
		Total	6,1	5			
	G_F (J/m ²)	Intergrupo	4.180	1	4.180	0,521	0,523
		Intragrupo	24.089	3	8.030		
		Total	28.269	4			
	IT (J/mm)	Intergrupo	500	1	500	0,040	0,855
		Intragrupo	37.905	3	12.635		
		Total	38.404	4			
	d_{0,5PM} (mm)	Intergrupo	0,00	1	0,00	0,157	0,712
		Intragrupo	0,07	4	0,02		
		Total	0,07	5			
-5	F_{max} (KN)	Intergrupo	0,16	1	0,16	13,066	0,022
		Intragrupo	0,05	4	0,01		
		Total	0,21	5			
	IRT (KN/mm)	Intergrupo	2,0	1	2,0	0,387	0,567
		Intragrupo	20,6	4	5,2		
		Total	22,6	5			
	G_F (J/m ²)	Intergrupo	99	1	99	0,020	0,895
		Intragrupo	14.501	3	4.834		
		Total	14.600	4			
	IT (J/mm)	Intergrupo	158	1	158	15,308	0,060
		Intragrupo	21	2	10		
		Total	179	3			
	d_{0,5PM} (mm)	Intergrupo	8,0E-8	1	8,0E-8	4,37E-5	0,995
		Intragrupo	0,01	4	0,00		
		Total	0,01	5			

A la vista de los resultados y teniendo en cuenta que en la fabricación de la mezcla se ha usado árido calizo, de carácter básico, caracterizado por ser menos hidrófilo y, por lo tanto, por presentar una mejor adhesividad con el ligante, se ha decidido estudiar el efecto del daño por humedad en la resistencia a la fisuración de la mezcla usando árido granítico. Los áridos graníticos son ácidos y tienen una gran afinidad por el agua, y consecuentemente una peor adhesividad con el ligante. A priori, la mezcla fabricada con este tipo de árido debería presentar un peor comportamiento frente a daño por humedad. La Tabla 4.10 muestra los valores promedio de densidad aparente y contenido de huecos de las probetas de mezcla bituminosa fabricadas con árido granítico.

Tabla 4.10. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de probetas de mezcla AC16S fabricadas con árido granítico.

Ligante	Densidad aparente (g/cm ³)		Contenido de huecos (%)	
	Promedio	σ	Promedio	σ
50/70	2,388	0,002	4,3	0,1
PMB 45/80-65	2,388	0,018	4,3	0,7

En la Tabla 4.11 se presentan los resultados promedio de los principales parámetros del ensayo Fénix para la mezcla fabricada con árido granítico y betún convencional (50/70) o betún modificado (PMB 45/80-65), a una temperatura de ensayo de 20°C. Para una mejor visualización, la Figura 4.8 muestra los resultados de forma gráfica.

Tabla 4.11. Resultados del ensayo Fénix a 20°C para probetas fabricadas con árido granítico, no acondicionadas (No acond) y sometidas a daño por humedad (Húmedas).

Parámetro		50/70		PMB 45/80-65	
		No acond	Húmedas	No acond	Húmedas
F_{max} (KN)	Media	0,6	0,7	0,6	0,7
	σ	0,1	0,1	0,0	0,0
	Cv	0,11	0,12	0,08	0,03
IRT (KN/mm)	Media	4,3	3,6	3,8	3,7
	σ	1,0	0,5	0,1	1,1
	Cv	0,23	0,14	0,03	0,31
G_F (J/m ²)	Media	322	371	315	365
	σ	46	20	41	43
	Cv	0,14	0,05	0,13	0,12
IT (J/mm)	Media	236	202	242	261
	σ	30	7	17	81
	Cv	0,13	0,03	0,07	0,31
d_{0,5PM} (mm)	Media	1,2	1,1	1,2	1,1
	σ	0,1	0,2	0,1	0,1
	Cv	0,11	0,14	0,06	0,13

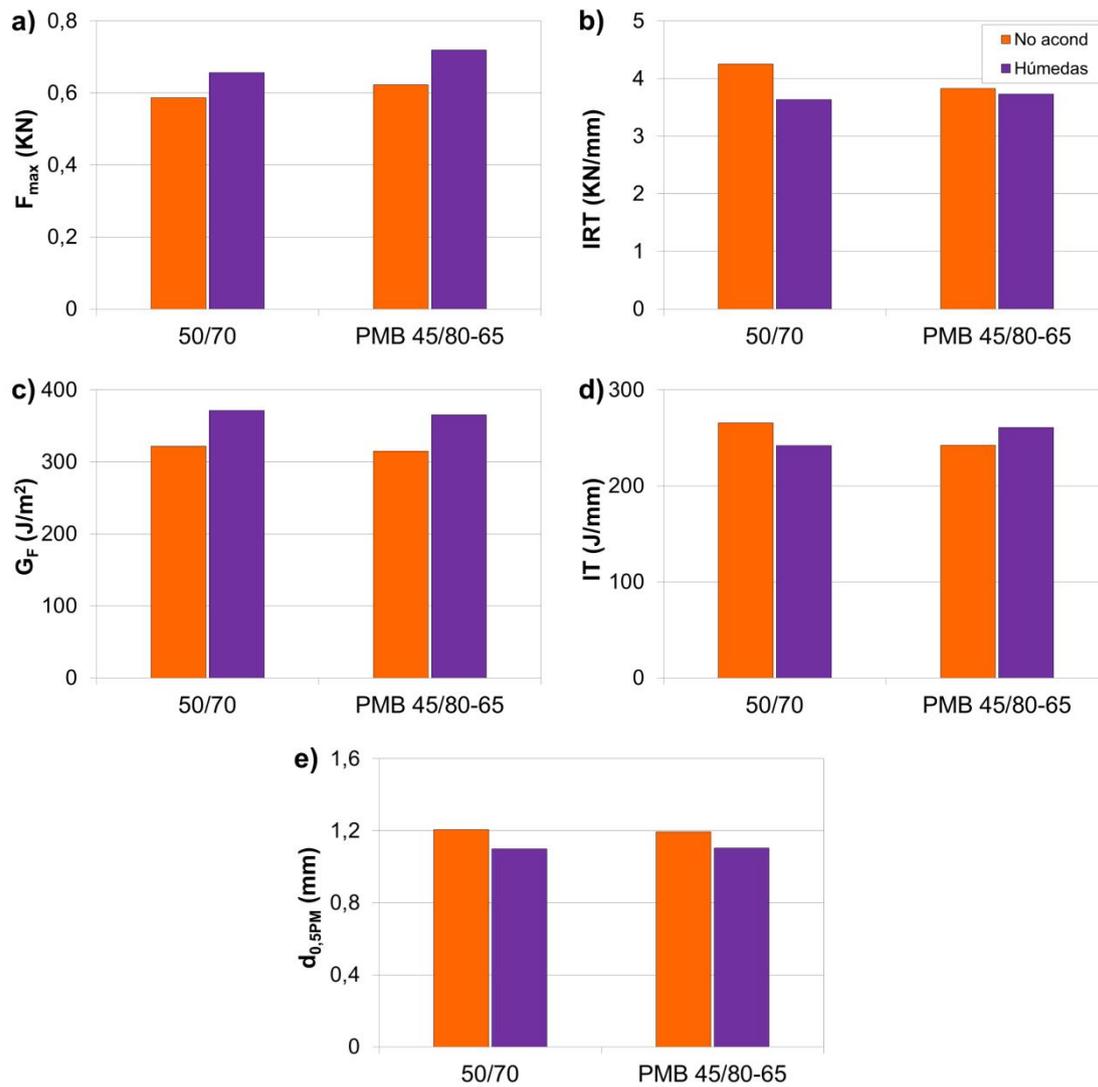


Figura 4.8. Resultados promedio de los principales parámetros obtenidos a partir del ensayo Fénix para las condiciones no acondicionado (No acond) y sometidas a daño por humedad (Húmedas): a) carga máxima (F_{max}), b) índice de rigidez a la tracción (IRT), c) energía de rotura (G_F), d) índice de tenacidad (IT) y e) desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico ($d_{0,5PM}$).

Al comparar los resultados de los parámetros del ensayo Fénix para la mezcla no acondicionada y la mezcla sometida a daño por humedad se observa de nuevo que las diferencias entre ambos son pequeñas. Esto queda confirmado a partir de los resultados del análisis de varianza realizado a los valores de los parámetros del ensayo (Tabla 4.12), obteniendo que para la mezcla fabricada con árido granítico tampoco existen diferencias significativas entre la mezcla no acondicionada y la mezcla sometida a daño por humedad.

Para verificar que los resultados obtenidos con el ensayo Fénix en el estudio del daño por humedad son consistentes con otros ensayos estandarizados, se ha realizado un pequeño estudio del efecto de la acción del agua en la resistencia de la misma mezcla, fabricada con árido calizo y betún convencional (50/70), usando el ensayo de tracción indirecta según la normativa UNE-

EN 12697-12 [209]. Se han realizado al menos tres ensayos para cada condición de estudio (probetas no acondicionadas y probetas sometidas a la acción del agua). La densidad aparente de las probetas de mezcla bituminosa ha sido de 2,420 g/cm³ y el porcentaje de huecos promedio del 3,4. Los resultados promedio del ensayo a tracción indirecta se muestran en la Figura 4.9. Los valores de resistencia a la tracción indirecta (ITS), así como los del ratio de resistencia a la tracción indirecta (ITSR), se muestran también en la figura. A partir de estos resultados, se obtienen conclusiones similares a las obtenidas a partir del ensayo Fénix: la resistencia a la fisuración en este tipo de mezcla semidensa, con un porcentaje de huecos relativamente pequeño, no se ve afectada por la acción del agua, obteniendo un ratio de resistencia a la tracción indirecta cercano al 100%.

Tabla 4.12. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla no acondicionada y la mezcla sometida a daño por humedad. Mezcla fabricada con árido granítico, ensayada a 20°C.

Betún	Parámetro	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad
50/70	F_{max} (KN)	Intergrupo	0,01	1	0,01	1,923	0,214
		Intragrupo	0,03	6	0,01		
		Total	0,04	7			
	IRT (KN/mm)	Intergrupo	0,6	1	0,6	1,242	0,316
		Intragrupo	2,6	5	0,5		
		Total	3,3	6			
	G_F (J/m ²)	Intergrupo	4.938	1	4.938	3,968	0,093
		Intragrupo	7.465	6	1.244		
		Total	12.403	7			
	IT (J/mm)	Intergrupo	1.356	1	1.356	2,155	0,238
		Intragrupo	1.887	3	629		
		Total	3.242	4			
	d_{0,5PM} (mm)	Intergrupo	4,5E-4	1	4,5E-4	0,010	0,924
		Intragrupo	0,27	6	0,05		
		Total	0,27	7			
PMB 45/80 -65	F_{max} (KN)	Intergrupo	0,02	1	0,02	13,936	0,010
		Intragrupo	0,01	6	0,00		
		Total	0,03	7			
	IRT (KN/mm)	Intergrupo	0,0	1	0,0	0,029	0,872
		Intragrupo	2,8	5	0,6		
		Total	2,8	6			
	G_F (J/m ²)	Intergrupo	4.339	1	4.339	1,530	0,271
		Intragrupo	14.183	5	2.837		
		Total	18.521	6			
	IT (J/mm)	Intergrupo	587	1	587	0,213	0,664
		Intragrupo	13.780	5	2.756		
		Total	14.367	6			
	d_{0,5PM} (mm)	Intergrupo	9,0E-5	1	9,0E-5	0,003	0,956
		Intragrupo	0,17	6	0,03		
		Total	0,17	7			

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Cortés [311] en su estudio sobre la durabilidad de mezclas bituminosas con áridos siderúrgicos donde el ensayo Fénix fue usado

para analizar el comportamiento de este tipo de mezclas frente a rotura.

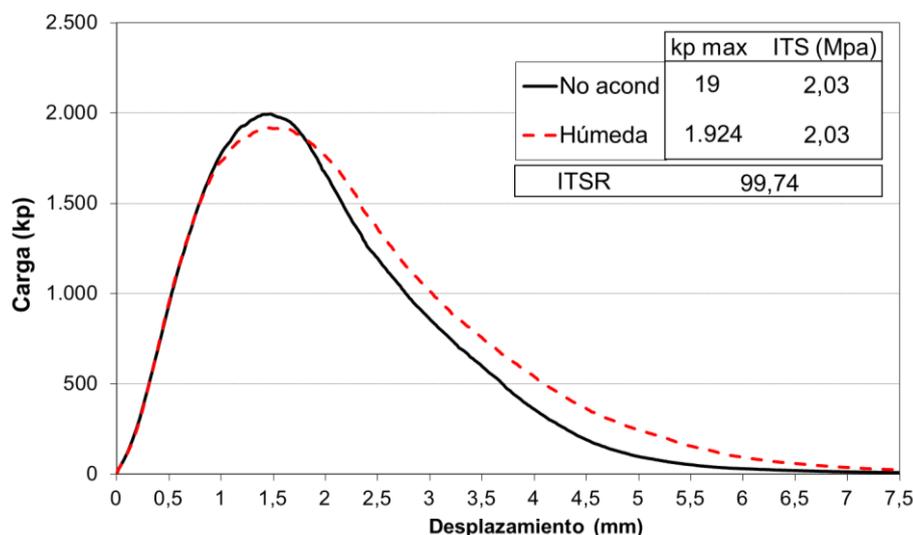


Figura 4.9. Resultados del ensayo a tracción indirecta de una probeta representativa no acondicionada (No acond) y otra sometida a daño por humedad (Húmeda), donde ITS es la resistencia a tracción indirecta e ITSR es el ratio de resistencia a la tracción indirecta.

1.1.3. Efecto combinado de envejecimiento y daño por humedad en la resistencia a la fisuración

En este apartado se analiza el efecto combinado del envejecimiento y de la acción del agua en la resistencia a la fisuración de la mezcla tipo AC16S, así como su efecto al variar el tipo de ligante y la temperatura de ensayo. Para ello, probetas de mezcla fabricadas con árido calizo usando un betún convencional (50/70) y otro betún modificado con polímeros (PMB 45/80-65), no acondicionadas y envejecidas sometidas a la acción del agua, han sido ensayadas mediante Fénix a diferentes temperaturas: 20, 5 y -5°C . Los valores promedio de densidad aparente y contenido de huecos de las probetas de mezcla bituminosa envejecidas que son sometidas a daño por humedad se muestran en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de probetas de mezcla AC16S envejecidas fabricadas con árido calizo para ser sometidas a daño por humedad.

Ligante	Densidad aparente (g/cm^3)		Contenido de huecos (%)	
	Promedio	σ	Promedio	σ
50/70	2,431	0,007	2,6	0,3
PMB 45/80-65	2,428	0,005	2,7	0,2

Al comparar los resultados de la mezcla envejecida con la mezcla envejecida sometida a daño por humedad se obtienen resultados similares a los obtenidos al comparar los resultados de la mezcla no acondicionada con la sometida a la acción del agua (Figura 4.10 y Figura 4.11). Esto está indicando que las diferencias entre las mezclas no acondicionadas y las envejecidas

sometidas a daño por humedad se deben principalmente al envejecimiento de las mismas, siendo el efecto del daño por humedad en este tipo de mezcla, aun encontrándose envejecida, prácticamente nulo.

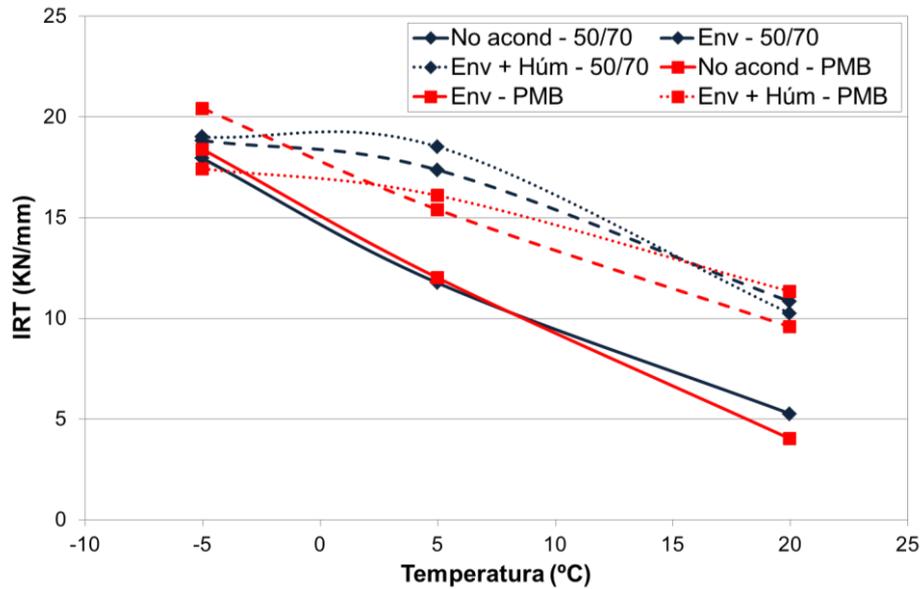


Figura 4.10. Valores del Índice de Rigidez a la Tracción (IRT) con respecto a la temperatura para la mezcla fabricada con los betunes 50/70 y PMB 45/80-65 en las condiciones: no acondicionada (No acond), envejecida (Env) y envejecida y sometida a la acción del agua (Env + Húm).

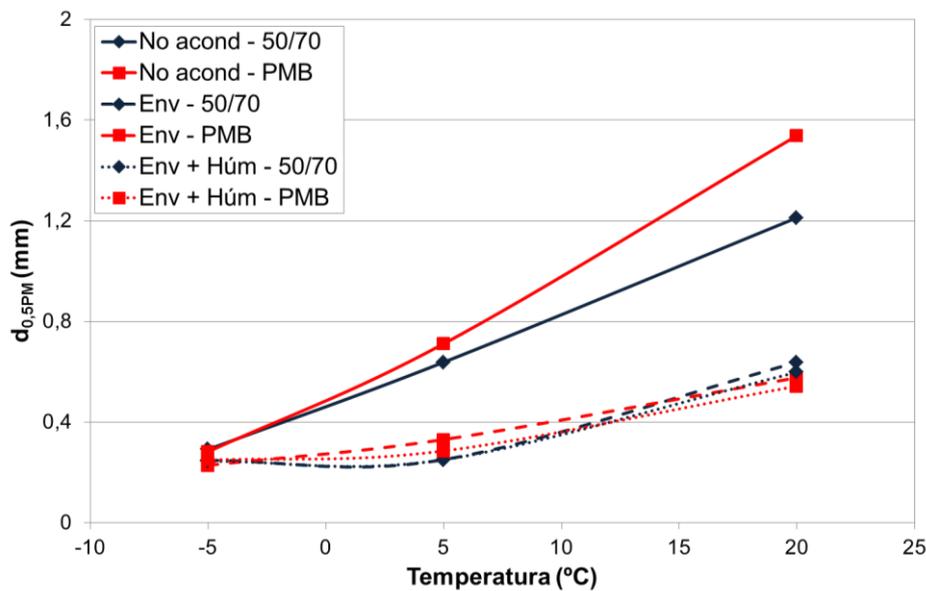


Figura 4.11. Valores del desplazamiento al 50% de la carga máxima postpico ($d_{0,5PM}$) con respecto a la temperatura para la mezcla fabricada con los betunes 50/70 y PMB 45/80-65 en las condiciones: no acondicionada (No acond), envejecida (Env) y envejecida y sometida a la acción del agua (Env + Húm).

La Tabla 4.14 y la Tabla 4.15, donde se muestran los resultados del análisis de varianza de los parámetros del ensayo Fénix obtenidos en probetas envejecidas y probetas envejecidas sometidas a daño por humedad, ponen de manifiesto la similitud entre los resultados obtenidos

para ambos acondicionamientos. Como en el caso anterior, la probabilidad de que los valores de un mismo parámetro, para ambas condiciones de estudio, sean similares es superior a 0,05, aceptándose la hipótesis nula, es decir, no existen diferencias significativas entre ambos

Tabla 4.14. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla envejecida y la mezcla envejecida sometida a daño por humedad. Mezcla con betún 50/70.

T (°C)	Parámetro	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad
20	F_{\max} (KN)	Intergrupo	0,05	1	0,05	5,338	0,081
		Intragrupo	0,04	4	0,01		
		Total	0,09	5			
	IRT (KN/mm)	Intergrupo	0,5	1	0,5	2,341	0,201
		Intragrupo	0,9	4	0,2		
		Total	1,4	5			
	G_F (J/m ²)	Intergrupo	1.002	1	1.002	1,208	0,352
		Intragrupo	2.489	3	830		
		Total	3.491	4			
	IT (J/mm)	Intergrupo	45	1	45	0,160	0,716
		Intragrupo	844	3	281		
		Total	889	4			
	$d_{0,5PM}$ (mm)	Intergrupo	0,00	1	0,00	0,796	0,423
		Intragrupo	0,01	4	0,00		
		Total	0,01	5			
5	F_{\max} (KN)	Intergrupo	0,55	1	0,55	5,354	0,082
		Intragrupo	0,41	4	0,10		
		Total	0,97	5			
	IRT (KN/mm)	Intergrupo	2,0	1	2,0	2,449	0,193
		Intragrupo	3,2	4	0,8		
		Total	5,2	5			
	G_F (J/m ²)	Intergrupo	1.671	1	1.671	1,165	0,341
		Intragrupo	5.736	4	1.434		
		Total	7.406	5			
	IT (J/mm)	Intergrupo	11	1	11	0,693	0,452
		Intragrupo	63	4	16		
		Total	73	5			
	$d_{0,5PM}$ (mm)	Intergrupo	7,18E-8	1	7,18E-8	8,77E-5	0,993
		Intragrupo	0,003	4	0,001		
		Total	0,003	5			
-5	F_{\max} (KN)	Intergrupo	0,19	1	0,19	4,192	0,110
		Intragrupo	0,18	4	0,05		
		Total	0,38	5			
	IRT (KN/mm)	Intergrupo	0,04	1	0,04	0,004	0,956
		Intragrupo	30,7	3	10,2		
		Total	30,8	4			
	G_F (J/m ²)	Intergrupo	258	1	258	0,155	0,714
		Intragrupo	6.663	4	1.666		
		Total	6.921	5			
	IT (J/mm)	Intergrupo	5	1	5	0,220	0,685
		Intragrupo	42	2	21		
		Total	46	3			
	$d_{0,5PM}$ (mm)	Intergrupo	1,57E-5	1	1,57E-5	0,026	0,881
		Intragrupo	0,002	4	0,001		
		Total	0,002	5			

Tabla 4.15. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla envejecida y la mezcla envejecida sometida a daño por humedad. Mezcla con betún PMB 45/80-65.

T (°C)	Parámetro	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad
20	F _{max} (KN)	Intergrupo	1,21	1	1,21	141,997	2,84E-4
		Intragrupo	0,03	4	0,01		
		Total	1,24	5			
	IRT (KN/mm)	Intergrupo	4,6	1	4,6	11,465	0,028
		Intragrupo	1,6	4	0,4		
		Total	6,3	5			
	G _F (J/m ²)	Intergrupo	679	1	679	0,313	0,606
		Intragrupo	8.681	4	2.170		
		Total	9.360	5			
	IT (J/mm)	Intergrupo	2	1	2	0,013	0,914
		Intragrupo	636	4	159		
		Total	639	5			
	d _{0,5PM} (mm)	Intergrupo	0,002	1	0,002	8,320	0,045
		Intragrupo	0,001	4	2,0E-4		
		Total	0,002	5			
5	F _{max} (KN)	Intergrupo	0,07	1	0,07	1,158	0,342
		Intragrupo	0,23	4	0,06		
		Total	0,30	5			
	IRT (KN/mm)	Intergrupo	0,4	1	0,4	0,434	0,578
		Intragrupo	1,7	2	0,8		
		Total	2,0	3			
	G _F (J/m ²)	Intergrupo	2.748	1	2.748	2,142	0,240
		Intragrupo	3.849	3	1.283		
		Total	6.597	4			
	IT (J/mm)	Intergrupo	38	1	38	1,289	0,339
		Intragrupo	89	3	30		
		Total	128	4			
	d _{0,5PM} (mm)	Intergrupo	0,003	1	0,003	5,866	0,073
		Intragrupo	0,002	4	0,001		
		Total	0,005	5			
-5	F _{max} (KN)	Intergrupo	0,08	1	0,08	2,579	0,184
		Intragrupo	0,13	4	0,03		
		Total	0,21	5			
	IRT (KN/mm)	Intergrupo	10,7	1	10,7	17,694	0,025
		Intragrupo	1,8	3	0,6		
		Total	12,6	4			
	G _F (J/m ²)	Intergrupo	28	1	27,892	0,027	0,878
		Intragrupo	4.147	4	1.036,682		
		Total	4.175	5			
	IT (J/mm)	Intergrupo	26	1	26	1,686	0,285
		Intragrupo	47	3	16		
		Total	73	4			
	d _{0,5PM} (mm)	Intergrupo	0,001	1	0,001	2,859	0,166
		Intragrupo	0,001	4	2,84E-4		
		Total	0,002	5			

1.1.4. Efecto del envejecimiento y del daño por humedad en la resistencia a la fisuración mediante el ensayo de tracción indirecta

En este apartado se muestran los resultados obtenidos del trabajo realizado en el Instituto Superior Técnico de la Universidad de Lisboa, donde se ha estudiado el efecto del envejecimiento y del daño por humedad en la resistencia a la fisuración de una mezcla cuyo ligante se ha modificado con nanoarcilla (bentonita) y con nanopartículas de hierro, usando el ensayo de tracción indirecta. Para ello, probetas de mezcla tipo AC14 fabricadas con árido granítico y tres tipos de ligantes (35/50, 35/50 modificado con nanoarcilla y 35/50 modificado con nanopartículas de hierro), no acondicionadas y acondicionadas (sometidas a daño por humedad y/o envejecidas) han sido ensayadas a tracción indirecta a una temperatura de 15°C. La densidad aparente promedio, así como el contenido de huecos promedio, se muestran en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16. Porcentaje de huecos promedio de las probetas de mezcla AC14.

Mezcla	Densidad aparente (g/cm ³)		Contenido de huecos (%)	
	Promedio	σ	Promedio	σ
Referencia	2,289	0,025	7,6	0,9
Nanoarcilla	2,322	0,027	6,2	1,1
Nanopartículas de hierro	2,346	0,021	5,3	0,8

La Figura 4.12 muestra los valores de resistencia a la tracción indirecta para todos los casos contemplados en este trabajo. Para el caso de las mezclas no acondicionadas, la resistencia a la tracción indirecta de la mezcla en la que el ligante ha sido modificado con nanoarcilla es significativamente superior con respecto a las otras mezclas.

Cuando las mezclas no envejecidas se someten a humedad, la resistencia disminuye en todos los casos. En las mezclas con ligante modificado, la resistencia tras inmersión es mayor que la de la mezcla de referencia, siendo muy similar para las dos mezclas modificadas con nanomateriales.

Cuando las mezclas son envejecidas, la resistencia a tracción indirecta aumenta por efecto del endurecimiento del ligante. Cuando se envejecen mediante el procedimiento LTOA, la resistencia de la mezcla modificada con bentonita es mayor que la de la referencia, siguiendo la misma tendencia que las no envejecidas. Cuando las mezclas envejecidas por el procedimiento LTOA son sometidas a daño por humedad, se observa el mismo comportamiento mostrado por las mezclas sin envejecer, en la mezcla de referencia y la mezcla modificada con nanoarcilla. Sin embargo, la resistencia de la mezcla modificada con nanopartículas de hierro muestra un comportamiento diferenciado al someterla a daño por humedad, disminuyendo su resistencia en menor medida que lo han hecho las mezclas en los otros dos casos de estudio. Esto está

indicando un comportamiento diferenciado de la mezcla en función de la modificación realizada y el acondicionamiento al que se encuentren sometidas.

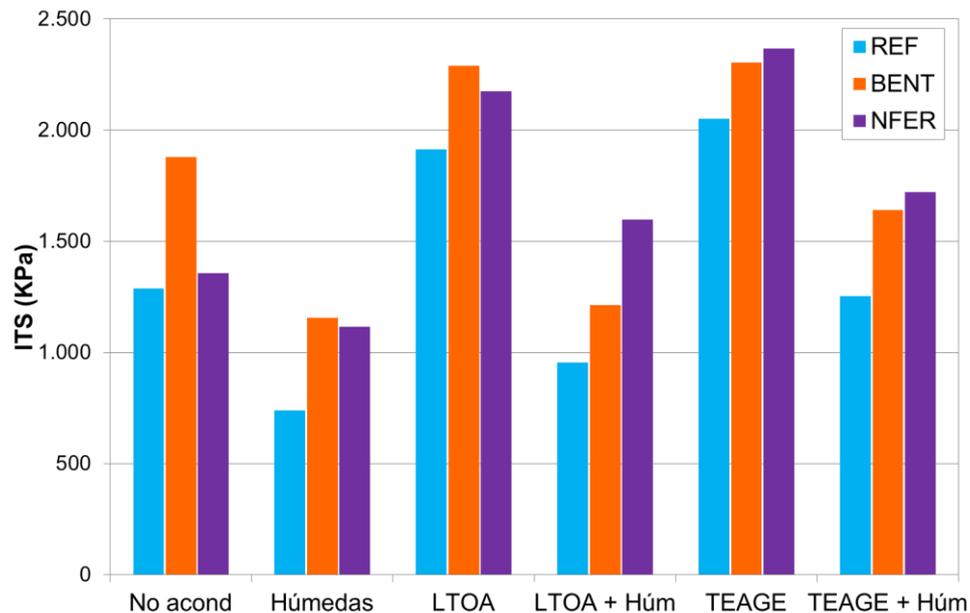


Figura 4.12. Valores promedio de resistencia a la tracción indirecta para la mezcla de referencia (REF) y la mezcla modificada con nanoarcilla (BENT) o con nanopartículas de hierro (NFER), en las condiciones: no acondicionado (No acond), sometido a daño por humedad (Húmedas), envejecidas mediante LTOA o TEAGE (LTOA o TEAGE) y envejecidas mediante LTOA o TEAGE y sometidas a daño por humedad (LTOA + Húm o TEAGE + Húm).

Al envejecer las mezclas mediante el procedimiento TEAGE, las mezclas modificadas con nanomateriales presentan una resistencia superior a la de la mezcla de referencia. Los valores de resistencia para ambas mezclas modificadas son relativamente similares, lo cual indica que ambas tienen un comportamiento similar frente a envejecimiento por UV. Cuando las mezclas envejecidas mediante el procedimiento TEAGE se someten a la acción del agua, la resistencia disminuye y se observa la misma tendencia entre ellas.

La Figura 4.13 muestra los valores promedio del índice de rigidez a la tracción obtenido a partir de las curvas del ensayo de tracción indirecta. Las tendencias observadas a partir de los valores de este índice son muy similares a las obtenidas a partir de los valores de resistencia a tracción indirecta, por lo que pueden extraerse las mismas conclusiones.

A partir de la curva carga-desplazamiento del ensayo de tracción indirecta también es posible obtener los valores de desplazamiento cuando en el ensayo se llega a la carga máxima. De esta manera, es posible analizar la deformación que es capaz de soportar la mezcla antes de romper. La Figura 4.14 muestra los valores promedio de este parámetro para los distintos casos estudiados. Cuando las mezclas no están acondicionadas, se observan diferencias en los valores de desplazamiento en función del tipo de ligante, siendo los valores de desplazamiento mayores cuando las mezclas se encuentran modificadas, y obteniendo valores más altos para la mezcla

modificada con nanopartículas de hierro. Al someter la mezcla a daño por humedad, los valores de desplazamiento bajan.

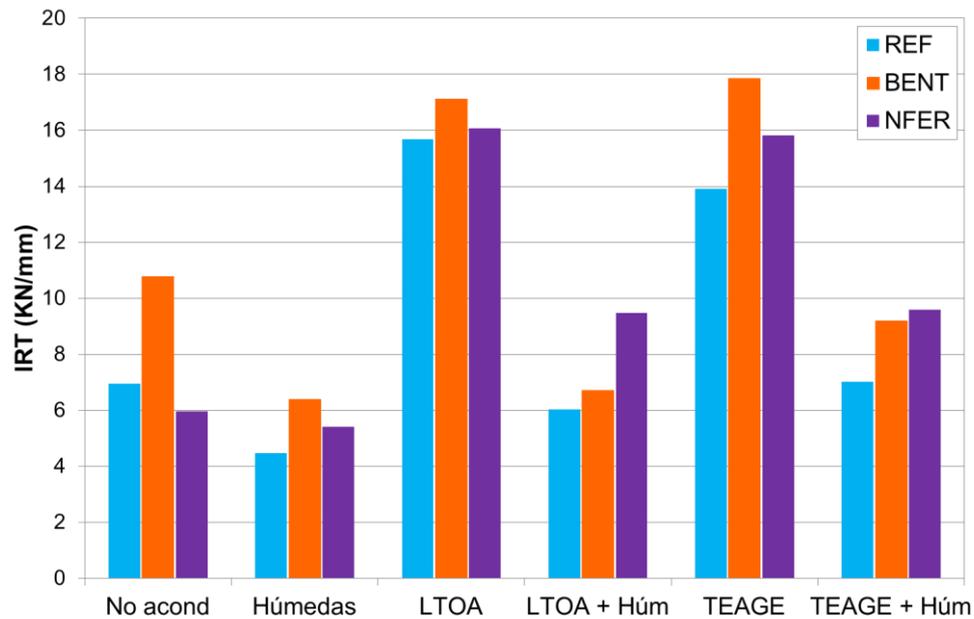


Figura 4.13. Valores promedio del índice de rigidez a la tracción (IRT) para la mezcla de referencia (REF) y la mezcla modificada con nanoarcilla (BENT) o con nanopartículas de hierro (NFER), en las condiciones: no acondicionado (No acond), sometido a daño por humedad (Húmedas), envejecidas mediante LTOA o TEAGE (LTOA o TEAGE) y envejecidas mediante LTOA o TEAGE y sometidas a daño por humedad (LTOA + Húm o TEAGE + Húm).

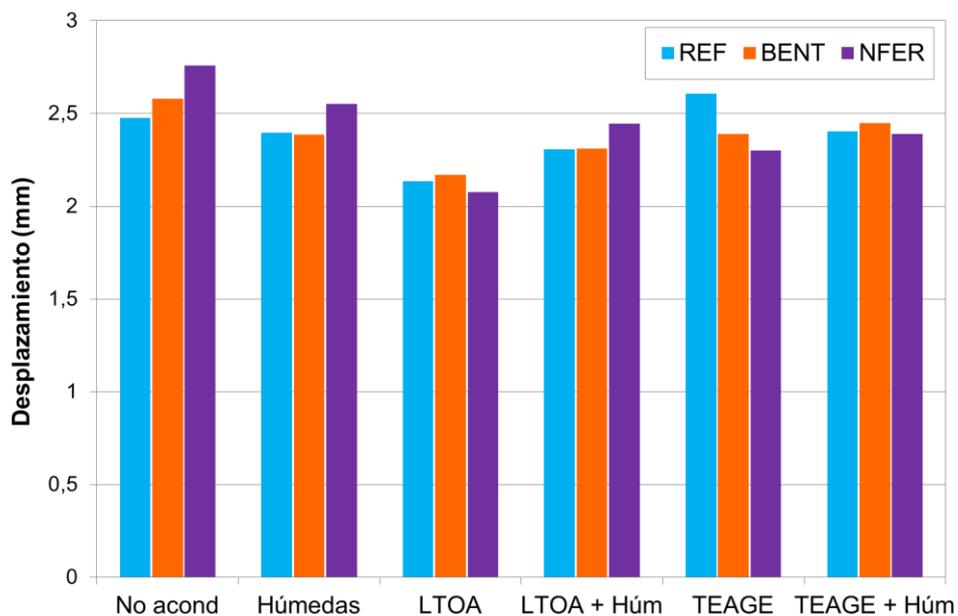


Figura 4.14. Valores promedio de desplazamiento cuando se alcanza la carga máxima en el ensayo de tracción indirecta para la mezcla de referencia (REF) y la mezcla modificada con nanoarcilla (BENT) o con nanopartículas de hierro (NFER), en las condiciones: no acondicionado (No acond), sometido a daño por humedad (Húmedas), envejecidas mediante LTOA o TEAGE (LTOA o TEAGE) y envejecidas mediante LTOA o TEAGE y sometidas a daño por humedad (LTOA + Húm o TEAGE + Húm).

Cuando las mezclas se envejecen mediante cualquiera de los dos procedimientos sometidas o no a la acción del agua, no se observan diferencias significativas entre las distintas mezclas, a excepción de las mezclas envejecidas mediante TEAGE no sometidas a daño por humedad. Por lo tanto, el desplazamiento cuando la carga alcanza el máximo, no es lo suficientemente sensible para observar el efecto modificador en el comportamiento de las mezclas cuando están envejecidas.

En la Figura 4.15 se presentan los valores promedio de energía elástica para todos los casos estudiados. La energía elástica se calcula como el área bajo la curva carga-desplazamiento hasta alcanzar el valor máximo de la carga. Analizando este valor, junto con los valores de resistencia y desplazamiento, se puede obtener una idea más clara del comportamiento de cada tipo de mezcla estudiada, para las distintas condiciones de estudio. Los valores de energía elástica en las mezclas modificadas no acondicionadas son mayores que los de la mezcla de referencia. Estas diferencias en el caso de la mezcla modificada con nanoarcilla vienen marcadas por valores altos de resistencia, mientras que en el caso de la mezcla modificada con nanopartículas de hierro viene marcada por unos valores más altos de desplazamiento. Así, cuando los valores de desplazamiento son similares entre las distintas mezclas, los valores de energía elástica siguen la misma tendencia marcada por los valores de resistencia, lo cual se observa en las demás condiciones estudiadas.

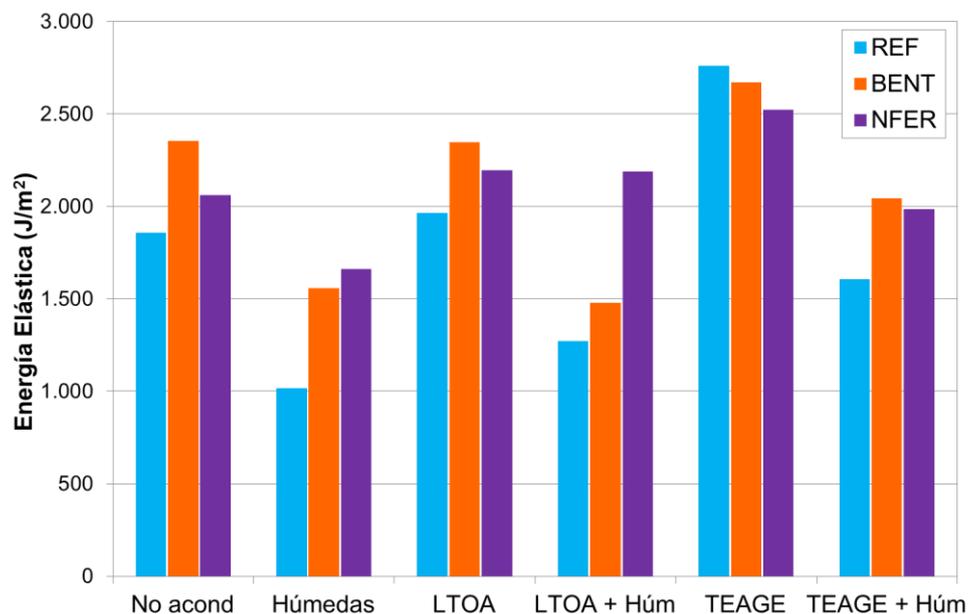


Figura 4.15. Valores promedio de energía elástica en el ensayo de tracción indirecta para la mezcla de referencia (REF) y la mezcla modificada con nanoarcilla (BENT) o con nanopartículas de hierro (NFER), en las condiciones: no acondicionado (No acond), sometido a daño por humedad (Húmedas), envejecidas mediante LTOA o TEAGE (LTOA o TEAGE) y envejecidas mediante LTOA o TEAGE y sometidas a daño por humedad (LTOA + Húm o TEAGE + Húm).

A continuación, se intenta analizar el efecto de los distintos acondicionamientos en la resistencia a la tracción indirecta:

Efecto del envejecimiento

La influencia del envejecimiento en la resistencia a tracción indirecta se ha analizado mediante el índice de envejecimiento. Valores de este índice cercanos a 1 indican que el efecto del envejecimiento sobre la resistencia a tracción indirecta es mínimo. A medida que los valores se alejan de 1, el efecto del envejecimiento en la resistencia es mayor. La Figura 4.16 muestra los valores promedio del índice de envejecimiento obtenido para los diferentes casos. En todos los casos, los mejores resultados se encuentran para la mezcla modificada con nanoarcilla, lo cual indica que la bentonita mejora el comportamiento de la mezcla frente a envejecimiento.

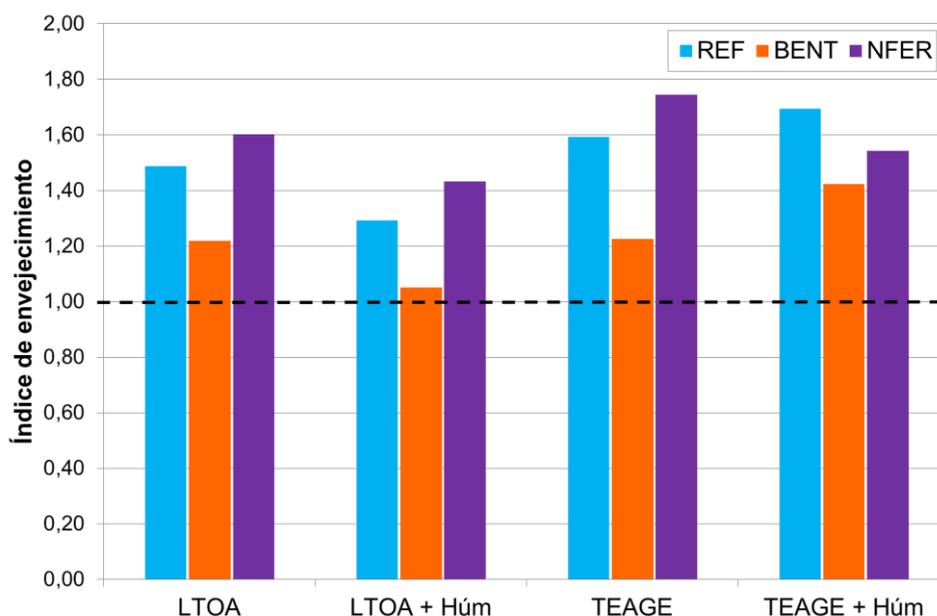


Figura 4.16. Valores promedio del índice de envejecimiento para la mezcla de referencia (REF) y la mezcla con betún modificada con nanoarcilla (BENT) o con nanopartículas de hierro (NFER), en las condiciones: envejecidas mediante LTOA o TEAGE (LTOA o TEAGE) y envejecidas mediante LTOA o TEAGE y sometidas a daño por humedad (LTOA + Húm o TEAGE + Húm).

Los valores del índice de envejecimiento, en el caso de envejecimiento mediante LTOA, son mayores cuando las mezclas no han sido sometidas a daño por humedad. Después de inmersión, el valor del índice de envejecimiento para la mezcla modificada con nanoarcilla se encuentra próximo a 1, mientras que la mezcla modificada con nanopartículas de hierro muestra el valor más alto del índice de envejecimiento.

Cuando las mezclas son envejecidas mediante TEAGE, estos índices son mayores que cuando se envejecen con LTOA, excepto para la mezcla modificada con nanoarcilla donde los

valores son similares. Al someter a la acción del agua las mezclas envejecidas mediante TEAGE, los valores de la mezcla de referencia y de la mezcla modificada con nanoarcilla aumentan, mientras que los de la mezcla modificada con nanopartículas de hierro disminuyen. Estos resultados indican que el agua está incidiendo de forma significativa en el comportamiento de las mezclas, obteniendo resultados en el comportamiento de las mezclas diferenciados en función de si se encuentran sometidas o no a la acción del agua.

Efecto de la acción del agua

Al someter las mezclas a daño por humedad, la resistencia a tracción indirecta, en las tres mezclas analizadas y en las dos condiciones de envejecimiento, disminuye significativamente. Sin embargo, se observan diferencias en el comportamiento de las mezclas frente a la acción del agua en función de los casos estudiados. Para estudiar en más detalle estas diferencias, se ha calculado la sensibilidad al agua de las mezclas ensayadas, expresada por el valor ITSR, el cual se define como la relación de resistencia a la tracción indirecta calculada como el cociente entre la resistencia a la tracción indirecta de probetas acondicionadas en agua (ITS_{wet}) y la resistencia a la tracción indirecta de probetas secas (ITS_{dry}), expresada en un porcentaje. Esta relación se calcula mediante la ecuación 4.1.

$$ITSR = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \times 100 \quad (4.1)$$

La Figura 4.17 muestra los valores promedio de la relación de resistencia a tracción indirecta para los distintos casos de estudio. Cuando las mezclas no envejecidas son sometidas a daño por humedad, la mezcla modificada con bentonita presenta un comportamiento similar al de la mezcla de referencia. Sin embargo, la mezcla modificada con nanopartículas de hierro presenta un mejor comportamiento frente a daño por humedad: la disminución de la resistencia a tracción indirecta es menor, lo cual se corresponde con un aumento importante del valor de ITSR, el cual aumenta en más de un 20% con respecto a la mezcla de referencia.

En el caso de las mezclas envejecidas con LTOA, al someterlas a daño por humedad, los valores de resistencia a la tracción indirecta siguen la misma tendencia que en el caso de las mezclas no envejecidas, pero con valores de ITSR menores.

Cuando las mezclas se encuentran envejecidas con el procedimiento TEAGE, éstas muestran una tendencia similar a los casos anteriores. Sin embargo, en este caso, los valores de las dos mezclas modificadas se han aproximado hasta ser prácticamente iguales.

Efecto combinado del envejecimiento y de la acción del agua

Para analizar el efecto combinado del envejecimiento y de la acción del agua en las mezclas se ha obtenido el ITSR de las mezclas, calculado como la relación entre la resistencia de la

mezcla envejecida y sometida a la acción del agua (ITS_{ag+wet}), y la resistencia de la misma mezcla no envejecida, seca (ITS_{dry}), la cual viene dada por la ecuación 4.2.

$$ITSR = \frac{ITS_{ag+wet}}{ITS_{dry}} \times 100 \quad (4.2)$$

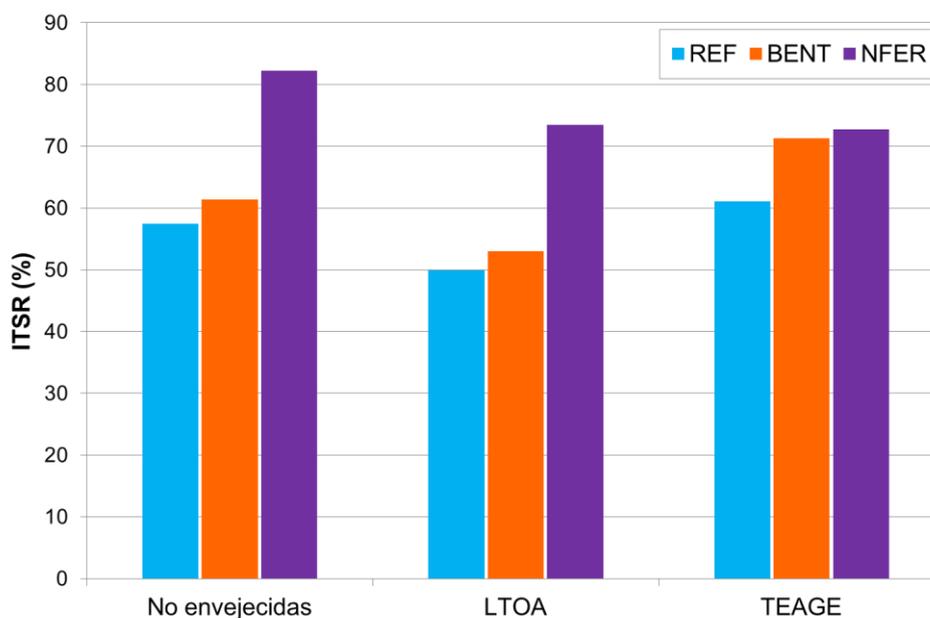


Figura 4.17. Valores promedio de la relación de resistencia a tracción indirecta (ITSR) entre las mezclas no acondicionadas y húmedas (No envejecidas) y las mezclas no acondicionadas y envejecidas mediante LTOA o TEAGE (LTOA o TEAGE), para los casos de la mezcla de referencia (REF) y la mezcla modificada con nanoarcilla (BENT) o con nanopartículas de hierro (NFER).

La Figura 4.18 muestra los resultados de este parámetro para los dos procedimientos de envejecimiento. Se observa que el efecto combinado del envejecimiento y de la acción del agua, en general, provoca una disminución de los valores de resistencia, a excepción de la mezcla modificada con nanopartículas de hierro.

En el caso de las mezclas envejecidas mediante LTOA, el ITSR de la mezcla modificada con nanoarcilla disminuye con respecto al de referencia, mientras que la mezcla modificada con nanopartículas de hierro presenta un ITSR superior a 1. Es decir, la resistencia de la mezcla después de ser sometida a envejecimiento y a la acción del agua ha aumentado. Esto se debe a que la resistencia a la tracción indirecta en este tipo de mezcla, cuando se envejece, aumenta significativamente con respecto a la mezcla no envejecida. Sin embargo, el efecto del agua no es tan alto como para disminuir los valores de resistencia por debajo de los obtenidos cuando la mezcla no está acondicionada.

Cuando las mezclas son envejecidas mediante TEAGE, se observa una tendencia similar a la que presentan las envejecidas mediante LTOA, aunque con valores de ITSR ligeramente

superiores a los anteriores para todas las mezclas.

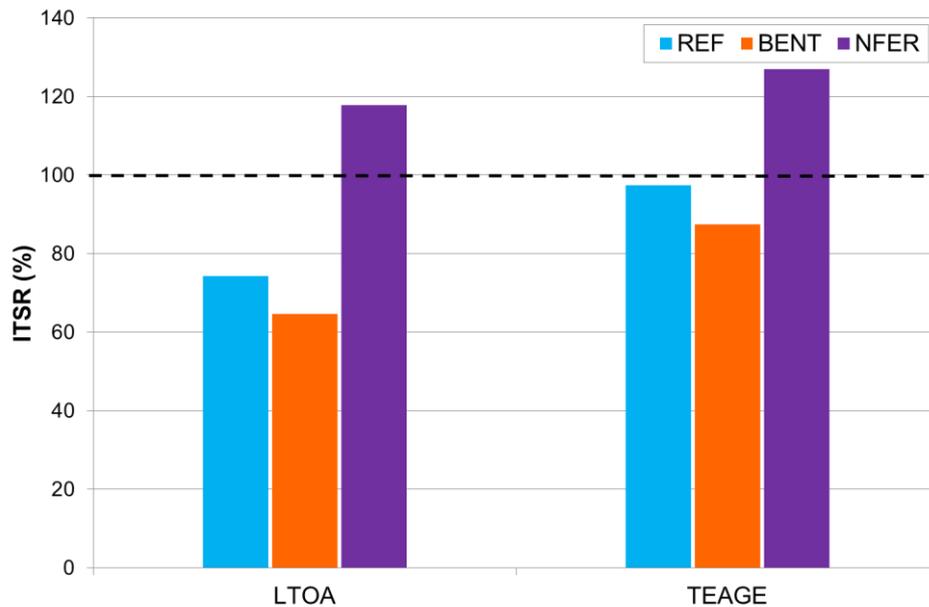


Figura 4.18. Valores promedio de la relación de resistencia a la tracción indirecta (ITSR) entre las mezclas no acondicionadas y envejecidas mediante LTOA o TEAGE sometidas a daño por humedad para los casos de la mezcla de referencia (REF) y la mezcla modificada con nanoarcilla (BENT) o con nanopartículas de hierro (NFER).

A partir de los resultados obtenidos, es posible concluir que el envejecimiento mediante TEAGE induce un envejecimiento distinto al provocado por el procedimiento LTOA, adaptándose el primero a la región para la que se pretende simular el envejecimiento. Mediante la observación visual de las probetas después de haber sido envejecidas con el procedimiento TEAGE, éstas muestran signos de degradación en forma de alteraciones visibles en su superficie como manchas y una decoloración del ligante que envuelve a los áridos. La Figura 4.19 muestra una imagen de las probetas antes y después de ser sometidas a envejecimiento mediante el procedimiento TEAGE, observándose un color más blanquecino después del envejecimiento. En la Figura 4.20 se muestra una de las manchas que han aparecido en las probetas de mezcla después de ser sometidas a envejecimiento TEAGE.



Figura 4.19. Probetas antes y después de someterlas a envejecimiento mediante TEAGE.



Figura 4.20. Manchas después del procedimiento de envejecimiento TEAGE.

1.2. Fatiga

Para el análisis del efecto del envejecimiento y del daño por humedad en la resistencia a la fisuración por fatiga de las mezclas, se ha aplicado el ensayo EBADE; este ensayo consiste en realizar un barrido de deformaciones con un ensayo cíclico de tensión-compresión.

1.2.1. Efecto del envejecimiento en la resistencia a la fisuración por fatiga

En esta sección se presenta el análisis de la influencia del envejecimiento en la fatiga de la mezcla seleccionada, evaluando el efecto del tipo de ligante (50/70 y PMB 45/80-65), el efecto del tipo de árido (calizo y granítico) y el efecto de la temperatura de ensayo: 20, 5 y -5°C .

Los valores promedio de densidad aparente y contenido de huecos de las probetas de mezcla fabricadas con árido calizo, no acondicionadas y envejecidas, se muestran en la Tabla 4.17.

Tabla 4.17. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de probetas de mezcla AC16S fabricadas con árido calizo, no acondicionadas y envejecidas.

Ligante	Acondicionamiento	Densidad aparente (g/cm^3)		Contenido de huecos (%)	
		Promedio	σ	Promedio	σ
50/70	No acondicionadas	2,462	0,006	1,8	0,2
	Envejecidas	2,434	0,011	3,0	0,4
PMB 45/80-65	No acondicionadas	2,455	0,006	2,1	0,2
	Envejecidas	2,429	0,012	3,1	0,5

A modo de ejemplo, la Figura 4.21 y la Figura 4.22 muestran la evolución del módulo y de la Densidad de Energía Disipada (DED en adelante) durante el ensayo EBADE para una probeta representativa de la mezcla fabricada con árido calizo y betún convencional, ensayada a 20°C . Como se puede observar, el envejecimiento produce un aumento sustancial del módulo. Además, en la evolución del módulo se observa cómo el envejecimiento fragiliza la mezcla, ya que cuando se produce la rotura de la mezcla, el módulo disminuye drásticamente. Esto se

observa también al analizar la evolución de la DED, cuando la mezcla rompe, la DED tiende a caer más rápido, y para un menor número de ciclos, en aquellas mezclas que han sido envejecidas.

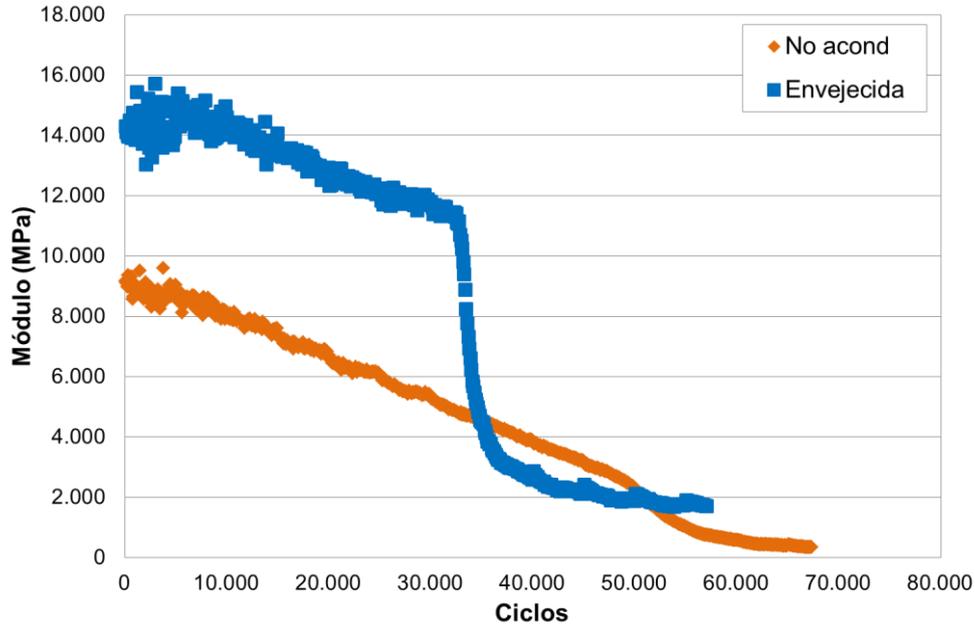


Figura 4.21. Evolución del módulo con el número de ciclos en el ensayo EBADE a 20°C de las probetas representativas de la mezcla AC16S fabricada con 50/70 en las condiciones: no acondicionada (No acond) y envejecida.

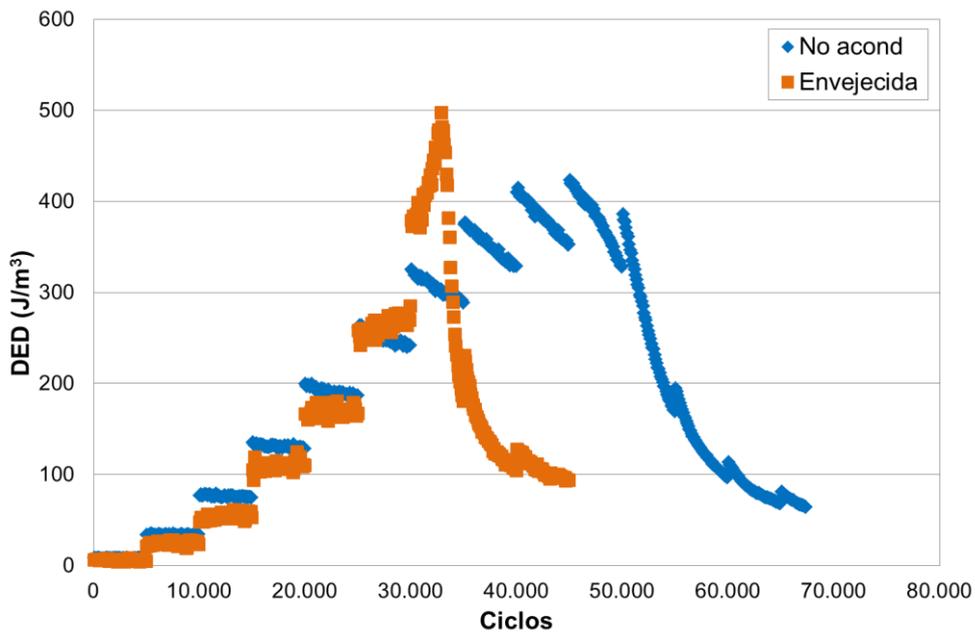


Figura 4.22. Evolución de la DED con el número de ciclos en el ensayo EBADE a 20°C de las probetas representativas de la mezcla AC16S fabricada con 50/70 en las condiciones: no acondicionada (No acond) y envejecida.

En la Tabla 4.18 y la Tabla 4.19 se presentan los resultados promedio de los dos principales parámetros que determinan el comportamiento a fatiga de la mezcla fabricada con betún convencional y con betún modificado, respectivamente. Estos parámetros son el módulo inicial (E_i) y la deformación de fallo (ϵ_{fallo}). El módulo inicial en el ensayo EBADE se define como el promedio de los valores de módulo en el primer escalón de deformación del ensayo, es decir, en los primeros 5.000 ciclos de carga correspondiente a una deformación de 25 $\mu\text{m/m}$. En cuanto a la deformación de fallo, ésta se obtiene a partir de los valores de DED como la correspondiente al escalón de deformación para el cual la DED máxima se reduce a la mitad.

Tabla 4.18. Resultados del ensayo EBADE para probetas no acondicionadas (No acond) y probetas envejecidas. Mezcla fabricada con betún 50/70.

Parámetro		20°C		5°C		-5°C	
		No acond	Envejecida	No acond	Envejecida	No acond	Envejecida
E_i (MPa)	Media	8.013	14.192	18.983	23.152	26.645	25.286
	σ	742	1.604	1.469	2.721	5.022	727
	Cv	0,09	0,11	0,08	0,12	0,19	0,03
ϵ_{fallo} ($\mu\text{m/m}$)	Media	264	175	126	75	74	92
	σ	26	32	10	24	24	34
	Cv	0,10	0,18	0,08	0,32	0,32	0,37

Tabla 4.19. Resultados del ensayo EBADE para probetas no acondicionadas y probetas envejecidas. Mezcla fabricada con betún PMB 45/80-65.

Parámetro		20°C		5°C		-5°C	
		No acond	Envejecida	No acond	Envejecida	No acond	Envejecida
E_i (MPa)	Media	6.479	11.457	15.214	18.985	18.925	21.631
	σ	747	463	1.784	4.253	2.014	975
	Cv	0,12	0,04	0,12	0,22	0,11	0,05
ϵ_{fallo} ($\mu\text{m/m}$)	Media	472	289	179	86	115	51
	σ	60	15	32	15	37	1
	Cv	0,13	0,05	0,18	0,18	0,32	0,03

A partir de los resultados obtenidos se observa que el envejecimiento produce un aumento en los valores de módulo inicial y una disminución en los valores de deformación de fallo. Esto queda más claro al analizar la evolución tanto del módulo como de la DED a lo largo del ensayo.

Para comprobar que el envejecimiento afecta significativamente al comportamiento de la mezcla frente a la fisuración por fatiga, a temperaturas medias (20°C), se ha realizado un análisis de varianza entre la mezcla no acondicionada y la mezcla envejecida (Tabla 4.20). Los resultados muestran que efectivamente el envejecimiento tiene un efecto notable en el comportamiento de la mezcla frente a la fisuración por fatiga.

Tabla 4.20. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla no acondicionada y la mezcla envejecida ensayada mediante EBADE a 20°C.

Betún	Parámetro	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad
50/70	E_i (MPa)	Intergrupo	57.276.415	1	57.276.415	36,679	0,004
		Intragrupo	6.246.162	4	1.561.540		
		Total	63.522.576	5			
	ε_{fallo} ($\mu\text{m/m}$)	Intergrupo	11.935	1	11.935	14,007	0,020
		Intragrupo	3.408	4	852		
		Total	15.343	5			
PMB 45/80 -65	E_i (MPa)	Intergrupo	35.409.878	1	35.409.878	72,359	3,69E-4
		Intragrupo	2.446.823	5	489.365		
		Total	37.856.701	6			
	ε_{fallo} ($\mu\text{m/m}$)	Intergrupo	47.551	1	47.551	16,273	0,010
		Intragrupo	14.610	5	2.922		
		Total	62.161	6			

1.2.1.1. Efecto del tipo de ligante y de la temperatura en el envejecimiento

La Figura 4.23 muestra los valores de deformación de fallo frente a los de módulo inicial de las dos mezclas no acondicionadas y envejecidas, ensayadas a las temperaturas de 20, 5 y -5°C. A temperaturas medias, cuando las mezclas no se encuentran envejecidas, el valor de deformación de fallo en la mezcla fabricada con betún modificado es superior al de la mezcla fabricada con betún convencional, mientras que el valor del módulo inicial es ligeramente inferior. La misma relación se observa cuando las mezclas son envejecidas y ensayadas a temperaturas medias. A temperaturas bajas, el valor del módulo inicial sigue siendo menor en la mezcla fabricada con betún modificado, sin embargo, la deformación de fallo muestra valores similares en ambos tipos de mezcla envejecida.

Si se analiza el efecto de la temperatura en el envejecimiento de las dos mezclas consideradas, se observa que a medida que disminuye la temperatura aumentan los valores del módulo inicial, lo cual indica un aumento en la rigidez de la mezcla y al mismo tiempo disminuyen los valores de deformación de fallo, es decir, las mezclas se vuelven más frágiles. Este efecto es similar al debido al envejecimiento de la mezcla. En la figura se observa que, para las dos mezclas, los valores de módulo y deformación de fallo en mezclas envejecidas se solapan con los valores de la misma mezcla no envejecida ensayada a temperaturas más bajas.

Para evaluar el efecto del envejecimiento en los parámetros del ensayo EBADE (deformación de fallo y módulo inicial) se ha obtenido el índice de envejecimiento para cada uno de ellos. La Figura 4.24 muestra los valores del índice de envejecimiento para los dos parámetros, para los dos tipos de ligante y las temperaturas de 20, 5 y -5°C. Se observa que a las temperaturas de 20 y 5°C ambas mezclas (con betún convencional y con betún modificado) se

ven afectadas por el envejecimiento de forma similar. Analizando los valores de índice de envejecimiento para el caso del módulo inicial se observa que a temperaturas medias las mezclas se ven más afectadas por el envejecimiento, y que a medida que baja la temperatura de ensayo, el efecto del envejecimiento es menor. En cuanto a la deformación de fallo, el envejecimiento tiene un efecto similar en todas las condiciones estudiadas (a excepción de la mezcla con betún modificado ensayada a -5°C), la deformación baja debido a la rigidez producida por este fenómeno.

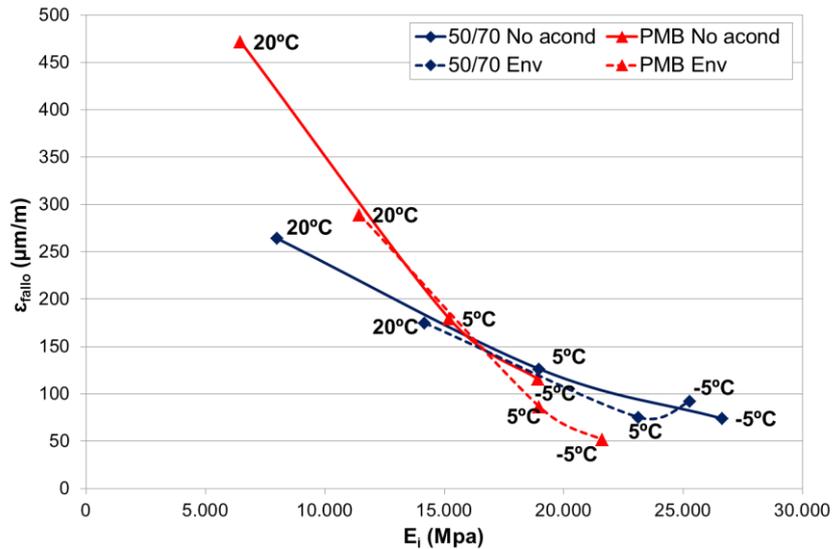


Figura 4.23. Valores de deformación de fallo (ϵ_{fallo}) frente al módulo inicial (E_i) en el ensayo EBADE a 20, 5 y -5°C , para la mezcla no acondicionada (No acond) y envejecida (Env), fabricada con los betunes: 50/70 y PMB 45/80-65.

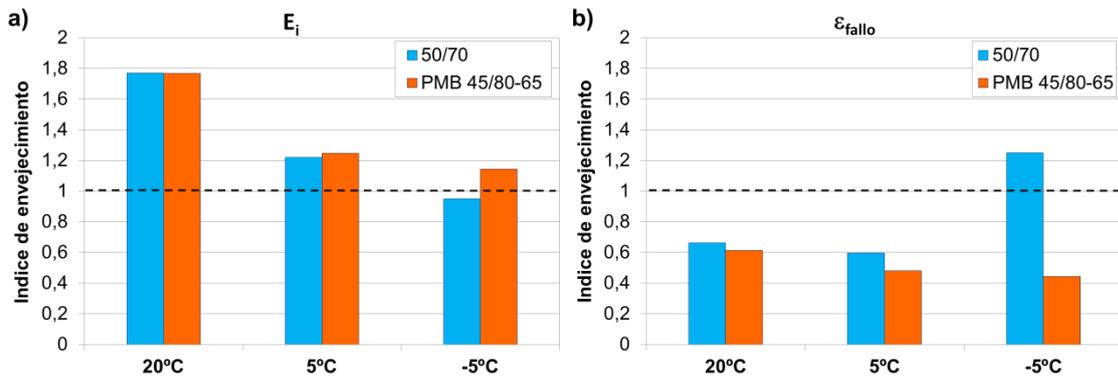


Figura 4.24. Valores del índice de envejecimiento para los parámetros del ensayo EBADE a las temperaturas de 20, 5 y -5°C : a) Módulo inicial y b) deformación de fallo.

1.2.1.2. Efecto del tipo de árido en el envejecimiento

Se ha estudiado el efecto del envejecimiento en la mezcla fabricada con distintos tipos de árido, en concreto, árido calizo y árido granítico. La Tabla 4.21 muestra los valores promedio de densidad aparente y contenido de huecos de las probetas de mezcla fabricada con los dos tipos

de árido y betún convencional.

Tabla 4.21. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de probetas de mezcla AC16S fabricadas con árido granítico, no acondicionadas y envejecidas.

Árido	Acondicionamiento	Densidad aparente (g/cm ³)		Contenido de huecos (%)	
		Promedio	σ	Promedio	σ
Calizo	No acondicionadas	2,462	0,006	1,8	0,2
	Envejecidas	2,434	0,011	3,0	0,4
Granítico	No acondicionadas	2,380	0,003	4,6	0,1
	Envejecidas	2,334	0,013	6,4	0,5

En la Figura 4.25 se comparan los dos principales parámetros del ensayo EBADE para la mezcla fabricada con árido calizo y árido granítico, ambas con betún convencional. En la figura se observa que ambas mezclas se comportan de forma similar frente a envejecimiento. La similitud en los resultados entre ambas mezclas queda patente al realizar un análisis de varianza (Tabla 4.22).

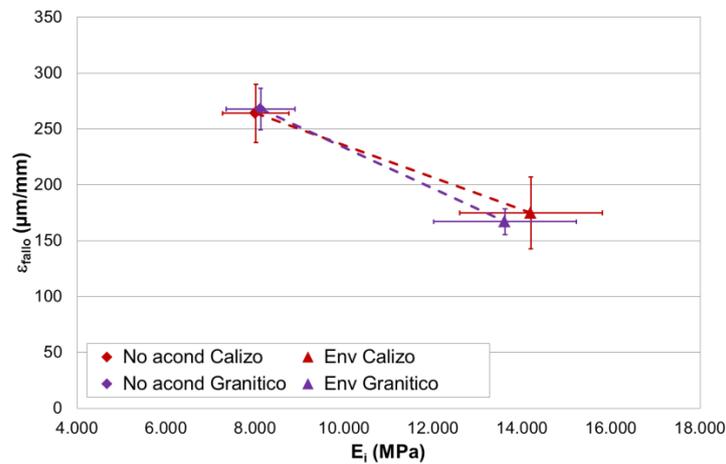


Figura 4.25. Valores de deformación de fallo (ϵ_{fallo}) frente al módulo inicial (E_i) del ensayo EBADE a 20°C para la mezcla no acondicionada (No acond) y envejecida (Env) fabricada con árido calizo y árido granítico.

Tabla 4.22. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla fabricada con árido calizo y con árido granítico, y ligante 50/70, ensayada mediante EBADE a 20°C.

Acondicio- namiento	Parámetro	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad
No acond	E_i (MPa)	Intergrupo	17.974	1	17.974	0,031	0,868
		Intragrupo	2.295.330	4	573.833		
		Total	2.313.304	5			
	ϵ_{fallo} ($\mu m/m$)	Intergrupo	21	1	21	0,042	0,848
		Intragrupo	2.032	4	508		
		Total	2.054	5			
Envejecidas	E_i (MPa)	Intergrupo	503.261	1	503.261	0,196	0,681
		Intragrupo	10.258.583	4	2.564.646		
		Total	10.761.845	5			
	ϵ_{fallo} ($\mu m/m$)	Intergrupo	92	1	92	0,159	0,711
		Intragrupo	2.322	4	581		
		Total	2.415	5			

1.2.2. Efecto del daño por humedad en la resistencia a la fisuración por fatiga

En este apartado se analiza el efecto de la acción del agua en la resistencia a la fisuración por fatiga de la mezcla AC16S, así como su efecto al variar el tipo de ligante y el tipo de árido. Para ello, probetas de mezcla fabricada con árido calizo o árido granítico y con un betún convencional o modificado con polímeros, sometidas o no a la acción del agua, han sido ensayadas mediante EBADE a una temperatura de 20°C.

Los valores promedio de densidad aparente y contenido de huecos de las probetas de mezcla fabricada con árido calizo, no acondicionadas y para someterlas a daño por humedad, se muestran en la Tabla 4.23.

Tabla 4.23. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de probetas de mezcla AC16S fabricadas con árido calizo, no acondicionadas y para ser sometidas a daño por humedad (Húmedas).

Ligante	Acondicionamiento	Densidad aparente (g/cm ³)		Contenido de huecos (%)	
		Promedio	σ	Promedio	σ
50/70	No acondicionadas	2,462	0,006	1,8	0,2
	Húmedas	2,450	0,010	2,3	0,4
PMB 45/80-65	No acondicionadas	2,455	0,006	2,1	0,2
	Húmedas	2,447	0,012	2,4	0,5

A modo de ejemplo, la Figura 4.26 representa la evolución del módulo y de la DED de una probeta representativa de la mezcla fabricada con árido calizo y betún modificado para los casos no acondicionada y sometida a daño por humedad, ensayadas a 20°C. En este ejemplo se observa visualmente las mínimas diferencias entre los resultados de la mezcla no acondicionada y de la mezcla sometida a daño por humedad.

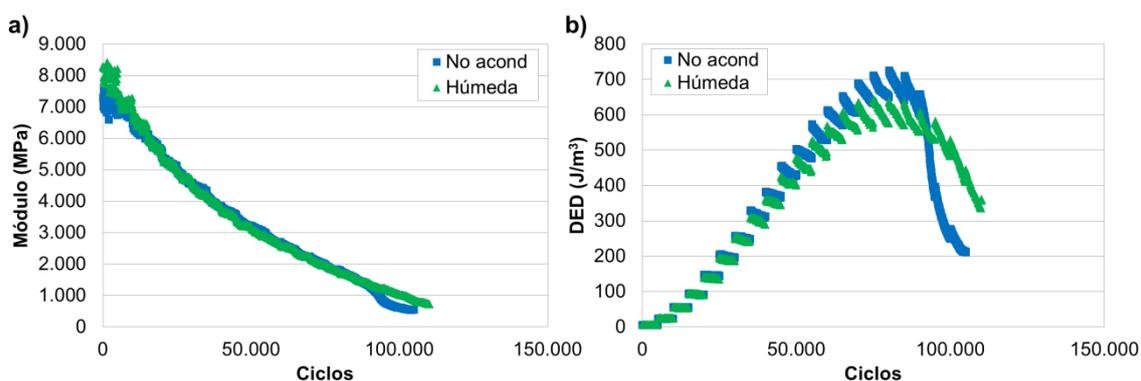


Figura 4.26. a) Evolución del módulo y b) evolución de la DED con el número de ciclos en el ensayo EBADE a 20°C de las probetas representativas de la mezcla AC16S fabricada con PMB 45/80-65 en las condiciones: no acondicionada (No acond) y sometida a daño por humedad (Húmeda).

La Tabla 4.24 muestra los resultados promedio de los principales parámetros del ensayo EBADE para la mezcla seleccionada fabricada con árido calizo y betún convencional o modificado. Al igual que ocurría al estudiar la resistencia de la mezcla a fisuración mediante el

ensayo Fénix, el efecto del agua en la resistencia a fisuración por fatiga para este tipo de mezcla es prácticamente nulo.

Tabla 4.24. Resultados del ensayo EBADE a 20°C para probetas de mezcla no acondicionadas (No acond) y probetas sometidas a daño por humedad (Húmedas). Mezcla fabricada con árido calizo.

Parámetro	50/70		PMB 45/80-65		
	No acond	Húmedas	No acond	Húmedas	
E_i (MPa)	Media	8.013	8.283	6.479	8.113
	σ	742	940	747	1.088
	Cv	0,09	0,11	0,12	0,13
ϵ_{fallo} ($\mu\text{m/m}$)	Media	264	271	471	514
	σ	26	24	60	97
	Cv	0,10	0,09	0,13	0,19

Para corroborar que las diferencias entre la mezcla no acondicionada y la mezcla sometida a daño por humedad son mínimas se ha realizado un análisis de varianza (ANOVA). Los resultados de este análisis se muestran en la Tabla 4.25.

Tabla 4.25. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla fabricada con árido calizo, no acondicionada y la misma sometida a daño por humedad, ensayada mediante EBADE a 20°C.

Betún	Parámetro	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad
50/70	E_i (MPa)	Intergrupo	109.280	1	109.280	0,152	0,716
		Intragrupo	2.869.470	4	717.368		
		Total	2.978.750	5			
	ϵ_{fallo} ($\mu\text{m/m}$)	Intergrupo	74	1	74	0,118	0,749
		Intragrupo	2.501	4	625		
		Total	2.575	5			
PMB 45/80 -65	E_i (MPa)	Intergrupo	5.006.951	1	5.006.951	6,533	0,043
		Intragrupo	4.598.567	6	766.428		
		Total	9.605.518	7			
	ϵ_{fallo} ($\mu\text{m/m}$)	Intergrupo	3.449	1	3.449	0,622	0,460
		Intragrupo	33.294	6	5.549		
		Total	36.743	7			

Teniendo en cuenta que para este tipo de mezcla, fabricada con árido calizo, el efecto del agua es nulo, se ha decidido estudiar el efecto del daño por humedad en la mezcla cambiando el tipo de árido de la mezcla por uno de tipo granítico, el cual presenta en general una peor adhesividad con el ligante. La Tabla 4.26 presenta los valores promedio de densidad aparente y contenido de huecos de las probetas de este tipo de mezcla.

Tabla 4.26. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de probetas de mezcla AC16S fabricadas con árido granítico y betún 50/70, no acondicionadas y para ser sometidas a daño por humedad (Húmedas).

Acondicionamiento	Densidad aparente (g/cm^3)		Contenido de huecos (%)	
	Promedio	σ	Promedio	σ
No acondicionadas	2,380	0,003	4,6	0,1
Húmedas	2,378	0,004	4,7	0,2

La Tabla 4.27 muestra los resultados de los principales parámetros obtenidos a partir del ensayo EBADE a 20°C para la mezcla seleccionada fabricada betún convencional. A partir de estos resultados se observa que la acción del agua sigue siendo nula, lo cual se confirma con un análisis de varianza (Tabla 4.28).

Tabla 4.27. Resultados del ensayo EBADE a 20°C para probetas de mezcla fabricada con árido granítico y betún 50/70, no acondicionada (No acond) y sometida a daño por humedad (Húmedas).

Parámetro	50/70		
	No acond	Húmedas	
E_i (MPa)	Media	8.122	7.950
	σ	773	592
	Cv	0,10	0,07
ϵ_{fallo} ($\mu\text{m/m}$)	Media	268	282
	σ	18	26
	Cv	0,07	0,09

Tabla 4.28. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla no acondicionada y la mezcla sometida a daño por humedad ensayada mediante EBADE a 20°C. Mezcla fabricada con árido granítico y betún convencional.

Parámetro	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad
E_i (MPa)	Intergrupo	44.612	1	44.612	0,094	0,774
	Intragrupo	1.895.309	4	473.827		
	Total	1.939.921	5			
ϵ_{fallo} ($\mu\text{m/m}$)	Intergrupo	326	1	326	0,631	0,472
	Intragrupo	2.067	4	517		
	Total	2.393	5			

A raíz de los resultados obtenidos, se ha procedido a cambiar el tipo de filler de la mezcla anterior (mezcla AC16S fabricada con árido granítico y betún convencional), pasando a usar uno de tipo arcilloso en lugar de granítico, y así estudiar su efecto en el comportamiento de la mezcla frente a la acción del agua. Los valores promedio de densidad aparente y contenido de huecos de las probetas se muestran en la Tabla 4.29.

Tabla 4.29. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de probetas de mezcla AC16S fabricadas con árido granítico, filler arcilloso y betún 50/70, no acondicionadas y para ser sometidas a daño por humedad (Húmedas).

Acondicionamiento	Densidad aparente (g/cm^3)		Contenido de huecos (%)	
	Promedio	σ	Promedio	σ
No acondicionadas	2,348	0,010	5,9	0,4
Húmedas	2,344	0,006	6,0	0,2

La Tabla 4.30 muestra los resultados obtenidos en el ensayo EBADE para este tipo de mezcla. A pesar de usar un filler de muy mala calidad, estos resultados vuelven a mostrar que la acción del agua apenas tiene efecto en el comportamiento de la mezcla frente a la fisuración por fatiga. La Tabla 4.31 muestra el análisis de varianza de los resultados obtenidos a partir de

EBADE que confirman que no existen diferencias significativas entre los valores de la mezcla no acondicionada y los de la mezcla sometida a daño por humedad.

Tabla 4.30. Resultados del ensayo EBADE a 20°C para probetas de mezcla fabricada con árido granítico, filler arcilloso y betún 50/70, en las condiciones: no acondicionada (No acond) y sometida a daño por humedad (Húmedas).

Parámetro	No acond	Húmedas
E_i (MPa)	Media	6.336
	σ	817
	Cv	0,13
ϵ_{fallo} ($\mu\text{m/m}$)	Media	248
	σ	31
	Cv	0,12

Tabla 4.31. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla no acondicionada y la mezcla sometida a daño por humedad ensayada mediante EBADE a 20°C. Mezcla fabricada con árido granítico, filler arcilloso y betún convencional.

Parámetro	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad
E_i (MPa)	Intergrupo	27.157	1	27.157	0,033	0,864
	Intragrupo	3.243.773	4	810.943		
	Total	3.270.930	5			
ϵ_{fallo} ($\mu\text{m/m}$)	Intergrupo	481	1	481	0,352	0,585
	Intragrupo	5.460	4	1.365		
	Total	5.941	5			

A la vista de los resultados obtenidos hasta el momento en el estudio del daño por humedad en la fisuración por fatiga de las mezclas, se ha procedido a modificar el protocolo de acondicionamiento en agua para hacerlo más severo. Para ello, las probetas de mezcla fabricadas con árido calizo y betún convencional se han acondicionado en un baño de agua durante 3 días, periodo similar al protocolo de acondicionamiento anterior, pero a una temperatura de 60°C. Los valores promedio de densidad aparente y contenido de huecos de estas probetas se muestran en la Tabla 4.32.

Tabla 4.32. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de probetas de mezcla AC16S fabricada con árido calizo y betún convencional, no acondicionadas y para ser sometidas a daño por humedad (Húmedas).

Acondicionamiento	Densidad aparente (g/cm^3)		Contenido de huecos (%)	
	Promedio	σ	Promedio	σ
No acondicionadas	2,421	0,008	5,6	0,1
Húmedas	2,413	0,009	5,2	0,1

La Tabla 4.33 presenta los valores promedio de los resultados de los principales parámetros del ensayo EBADE para el caso de estudio. Se observa que aun variando las condiciones de inmersión de las probetas por otras más agresivas, el efecto de la acción del agua sigue siendo

prácticamente inapreciable, como demuestra el análisis de varianza de los resultados obtenidos (Tabla 4.34).

Tabla 4.33. Resultados del ensayo EBADE a 20°C para probetas de mezcla fabricada con árido calizo y betún 50/70, en las condiciones: no acondicionada (No acond) y sometida a daño por humedad con un acondicionamiento más agresivo (Húmedas).

Parámetro	No acond	Húmedas
E_i (MPa)	Media	6.963
	σ	1.118
	Cv	0,16
ϵ_{fallo} ($\mu\text{m/m}$)	Media	303
	σ	6
	Cv	0,02

Tabla 4.34. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla no acondicionada y la mezcla sometida a daño por humedad con un acondicionamiento más agresivo, ensayada mediante EBADE a 20°C. Mezcla fabricada con árido calizo y betún 50/70.

Parámetro	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad
E_i (MPa)	Intergrupo	838.053	1	838.053	0,905	0,395
	Intragrupo	3.703.108	4	925.777		
	Total	4.541.161	5			
ϵ_{fallo} ($\mu\text{m/m}$)	Intergrupo	2.005	1	2.005	2,792	0,170
	Intragrupo	2.872	4	718		
	Total	4.877	5			

1.2.3. Efecto combinado de envejecimiento y daño por humedad en la resistencia a la fisuración por fatiga

En este apartado se analiza el efecto combinado del envejecimiento y del daño por humedad en la resistencia a la fisuración por fatiga de la mezcla AC16S, así como su efecto al variar el tipo de ligante y el tipo de árido. Para ello, probetas de mezcla fabricadas con árido calizo, árido granítico y árido granítico con un fíller de tipo arcilloso, usando un betún convencional y otro modificado con polímeros, envejecidas y después sometidas a daño por humedad, son ensayadas a EBADE a una temperatura de 20°C. Los valores promedio de densidad aparente y contenido de huecos de las probetas ensayadas para los distintos tipos de árido y ligante considerados se muestran en la Tabla 4.35.

La Figura 4.27 muestra los valores promedio de deformación de fallo frente a módulo inicial de las distintas mezclas estudiadas: mezcla fabricada con árido calizo y betún 50/70, mezcla fabricada con árido calizo y betún PMB 45/80-65, mezcla fabricada con árido granítico y betún 50/70 y mezcla fabricada con árido granítico, fíller arcilloso y betún 50/70. A raíz de estos

resultados, y teniendo en cuenta el análisis de varianza de los mismos, comparando la mezcla envejecida con la envejecida sometida a daño por humedad (Tabla 4.36 y Tabla 4.36), se puede concluir que no existen diferencias significativas entre mezclas envejecidas y envejecidas sometidas a daño por humedad, a excepción de los valores de la deformación de fallo obtenida a partir de la mezcla fabricada con árido calizo y betún modificado.

Tabla 4.35. Densidad aparente y contenido de huecos promedio de probetas de mezcla AC16S envejecidas para ser sometidas a daño por humedad.

Árido	Ligante	Densidad aparente (g/cm ³)		Contenido de huecos (%)	
		Promedio	σ	Promedio	σ
Calizo	50/70	2,437	0,009	2,8	0,4
	PMB 45/80-65	2,446	0,003	2,5	0,1
Granítico	50/70	2,296	0,018	8,0	0,7
Granítico + fíller arcilloso	50/70	2,288	0,010	8,8	0,4

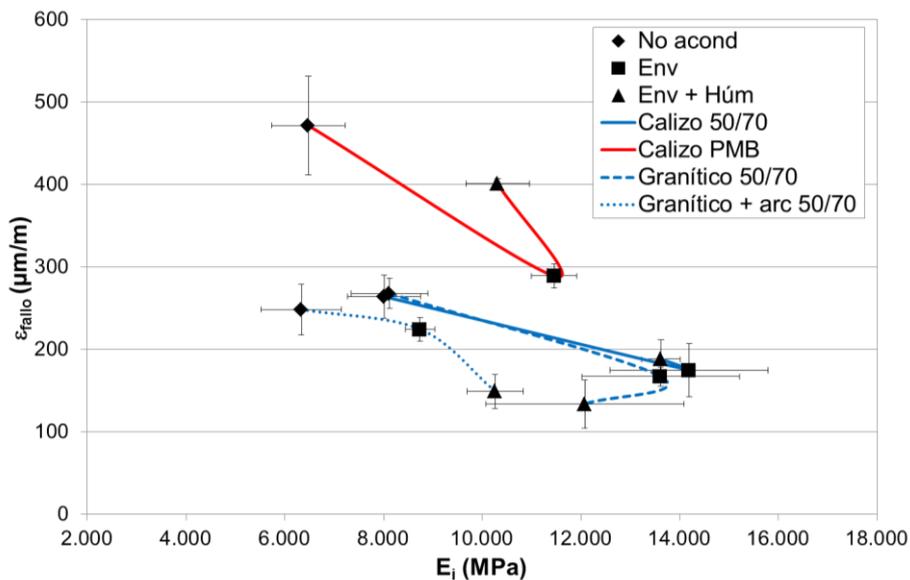


Figura 4.27. Valores de deformación de fallo frente a módulo inicial de la mezcla fabricada con betún 50/70 y árido calizo (Calizo 50/70), con betún PMB 45/80-65 y árido calizo (Calizo PMB), betún 50/70 y árido granítico (Granítico 50/70) y, betún 50/70 y árido granítico usando un fíller arcilloso (Granítico + arc 50/70) para las condiciones: no acondicionada (No acond), envejecida (Env) y envejecida sometida a daño por humedad (Env + Húm).

Tabla 4.36. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla envejecida y la mezcla sometida a daño por humedad ensayada mediante EBADE a 20°C. Mezcla fabricada con árido calizo y betún PMB 45/80-65.

Parámetro	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad
E_i (MPa)	Intergrupo	1.570.184	1	1.570.184	4,468	0,125
	Intragrupo	1.054.328	3	351.443		
	Total	2.624.512	4			
ε_{fallo} (μm/m)	Intergrupo	15.019	1	15.019	153,245	0,001
	Intragrupo	294	3	98		
	Total	15.213	4			

Tabla 4.37. Resultados del análisis de varianza entre la mezcla envejecida y la mezcla sometida a daño por humedad ensayada mediante EBADE a 20°C. Mezcla fabricada con árido calizo, árido granítico o árido granítico y filler arcilloso y betún 50/70.

Árido	Parámetro	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad
Calizo	E_i (MPa)	Intergrupo	613.925	1	613.925	0,641	0,454
		Intragrupo	5.745.083	6	957.514		
		Total	6.359.008	7			
	ϵ_{fallo} ($\mu\text{m/m}$)	Intergrupo	329	1	329	0,463	0,522
		Intragrupo	4.257	6	710		
		Total	4.586	7			
Granítico	E_i (MPa)	Intergrupo	3.530.875	1	3.530.875	1,073	0,359
		Intragrupo	13.166.097	4	3.291.524		
		Total	16.696.972	5			
	ϵ_{fallo} ($\mu\text{m/m}$)	Intergrupo	1.650	1	1.650	3,332	0,142
		Intragrupo	1.981	4	495		
		Total	3.631	5			
Granítico y filler arcilloso	E_i (MPa)	Intergrupo	2.305.054	1	2.305.057	11,246	0,079
		Intragrupo	409.918	2	204.959		
		Total	2.714.972	3			
	ϵ_{fallo} ($\mu\text{m/m}$)	Intergrupo	5.658	1	5.658	18,041	0,051
		Intragrupo	627	2	314		
		Total	6.285	3			

2. Leyes de fatiga

El ensayo EBADE (Ensayo de BArrido de DEformaciones) permite el estudio de la resistencia a fatiga de una mezcla de forma más rápida que los ensayos clásicos de fatiga, denominados ensayos de barrido de tiempo, partiendo de dos parámetros: el módulo inicial y la deformación de fallo. Tal y como se ha indicado anteriormente, el módulo inicial en el ensayo EBADE se define como el valor medio del módulo en el primer escalón de carga del ensayo, es decir, en los primeros 5.000 ciclos. La deformación de fallo se define como la equivalente al escalón de deformación en el cual la DED máxima se reduce a la mitad, punto en el cual se considera que se produce el fallo de la mezcla en este ensayo.

Sin embargo, el modo con el que habitualmente se estudia el comportamiento a fatiga de una mezcla es a partir de su ley de fatiga, ecuación que relaciona el número de ciclos que es capaz de soportar antes de que se produzca su fallo, con la deformación que se le impone. El ensayo EBADE, al tratarse de un ensayo de barrido de deformaciones, no permite relacionar directamente estos parámetros. Sin embargo, como se muestra a continuación, a partir de los resultados obtenidos mediante el ensayo EBADE se pueden estimar las leyes de fatiga de las mezclas bituminosas.

Para validar el método propuesto, las leyes de fatiga obtenidas mediante el ensayo EBADE para la mezcla AC16S fabricada con dos tipos de betún, un betún convencional y otro modificado con polímeros, son comparadas con las obtenidas mediante los ensayos de barrido de tiempo en tracción-compresión llevados a cabo sobre la misma mezcla.

2.1. Barrido de deformaciones

Para estudiar el comportamiento a fatiga de la mezcla, en primer lugar se ha realizado un ensayo de barrido de deformaciones (ensayo EBADE) mediante el cual se pretende conocer el nivel de deformación para el cual la mezcla no va a romper y el nivel de deformación para el cual la mezcla romperá en un número de ciclos bajo. El ensayo EBADE se ha realizado sobre probetas de mezcla bituminosa no acondicionadas, sometidas a daño por humedad, envejecidas y envejecidas sometidas a daño por humedad, fabricadas con árido calizo, y con dos tipos de betún (50/70 y PMB 45/80-65).

A continuación, se presentan los resultados para la mezcla bituminosa no acondicionada fabricada con árido calizo, dos tipos de betún (50/70 y PMB 45/80-65) y a una temperatura de ensayo de 20°C. La Figura 4.28 muestra la evolución de la DED con el número de ciclos durante el ensayo EBADE de una probeta representativa de la mezcla fabricada con el betún convencional (50/70). Se observa que, en los primeros escalones de deformación, la variación de la DED para un mismo escalón es prácticamente nula, lo cual indica que el daño en la probeta es mínimo y que, en un ensayo de barrido de tiempo, para esa deformación, se necesitaría un elevado número de ciclos para llegar al fallo del material estudiado. A medida que la deformación aumenta, aumenta la variación de la DED para un mismo escalón de deformación, lo cual indica que la probeta se está dañando. Una vez la DED alcanza su máximo en el ensayo, ésta comienza a decrecer bruscamente en un mismo escalón de deformación, indicando que se está produciendo el fallo total del material. A partir de la curva de DED, se establece el criterio de fallo de la mezcla en el ensayo EBADE, definido como el nivel de deformación en que la DED máxima experimentada por el material durante el proceso de fatiga se reduce a la mitad. De acuerdo con este criterio, el fallo de la mezcla fabricada con betún convencional tiene lugar para una deformación de 275 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Para poder comparar los resultados obtenidos mediante el ensayo EBADE con las leyes de fatiga obtenidas a partir de un ensayo de barrido de tiempo, con la misma geometría de probeta del ensayo EBADE, se establecen los valores de la deformación que se va a imponer en el ensayo de barrido de tiempo a partir del estudio del comportamiento a fatiga de la mezcla bituminosa mediante el ensayo EBADE. Como se observa en la Figura 4.28, el valor máximo de DED se encuentra para el décimo escalón de deformación, por lo cual, lo ideal es establecer los

valores de deformación del ensayo de barrido de tiempo por debajo de este valor, abarcando la mayor amplitud posible de valores de deformación; debe tenerse en cuenta que para valores muy bajos de deformación el ensayo tendrá una duración elevada y puede que no se llegue a la rotura de la mezcla, mientras que para valores muy altos de deformación, la probeta puede romper sin llegar a fatigarse, dando valores anómalos no adecuados para la obtención de las leyes de fatiga del material. Así, se han escogido los escalones de deformación 3, 4, 5, 7 y 9 para el cálculo de las leyes de fatiga a partir del ensayo de barrido de tiempo a tracción-compresión. Estos escalones corresponden a las deformaciones de 75, 100, 125, 175 y 225 $\mu\text{m}/\text{m}$, respectivamente.

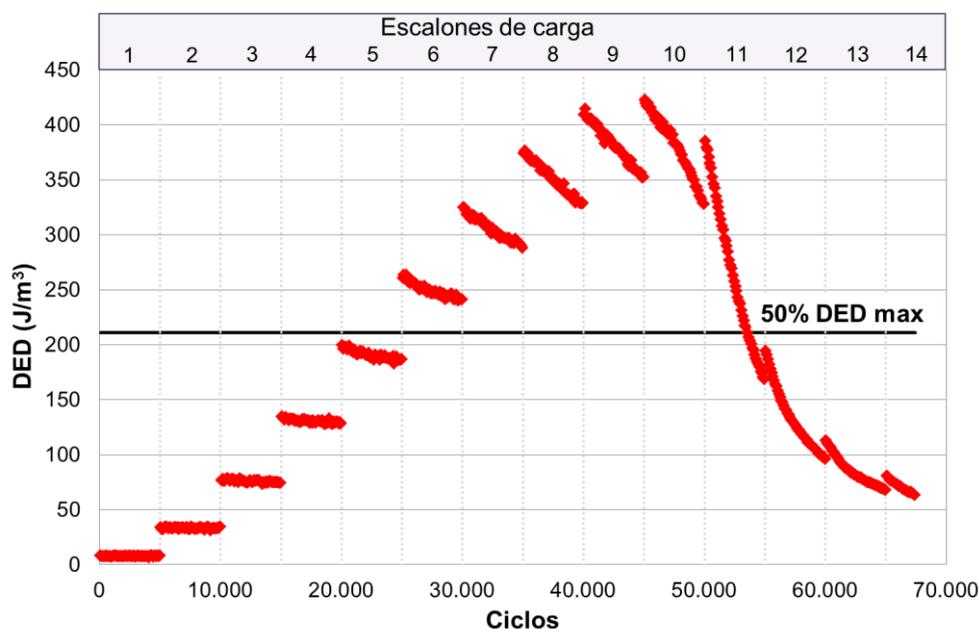


Figura 4.28. Evolución de la DED con el número de ciclos. Ensayo EBADE a 20°C y 10 Hz. Mezcla AC16S con ligante 50/70.

La Figura 4.29 muestra los valores de DED frente al número de ciclos de una probeta representativa obtenidos en el ensayo EBADE realizado sobre la mezcla fabricada con betún modificado con polímeros (PMB 45/80-65). La tendencia de los valores de DED respecto al número de ciclos es similar a la obtenida anteriormente (Figura 4.28). En este caso, el fallo de la mezcla, según el criterio establecido, se produce para una deformación de 475 $\mu\text{m}/\text{m}$. Por tanto, la mezcla es capaz de soportar un mayor número de ciclos hasta su fallo. Al igual que en el caso anterior, mediante esta curva se determinan los valores de deformación a partir de los cuales realizar los diferentes ensayos de barrido de tiempo y así obtener la ley de fatiga del material. Para el betún modificado, se han escogido los escalones de deformación 7, 9, 11, 14 y 17 para el ensayo de barrido de tiempo a tracción-compresión, correspondientes a las deformaciones de 175, 225, 275, 350 y 425 $\mu\text{m}/\text{m}$, respectivamente.

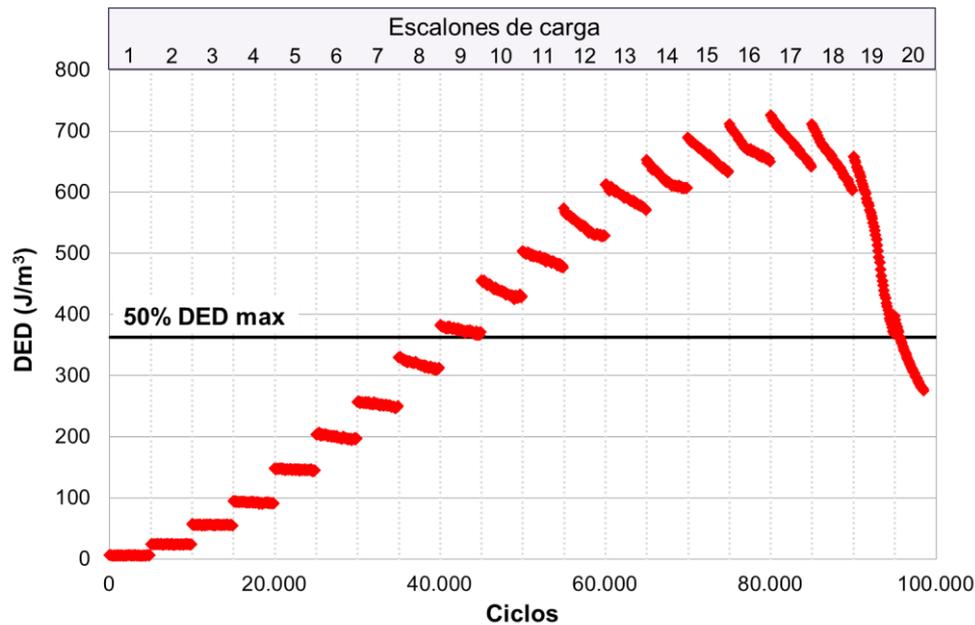


Figura 4.29. Evolución de la DED con el número de ciclos. Ensayo EBADE a 20°C y 10 Hz. Mezcla AC16S con ligante PMB 45/80-65.

La Figura 4.30 representa la evolución del módulo complejo de una probeta representativa de la mezcla para los dos betunes considerados (50/70 y PMB 45/80-65). En la gráfica se observa, el progresivo deterioro de la mezcla durante el proceso de fatiga. Como ya se ha observado para la DED, el módulo de la mezcla fabricada con betún convencional disminuye de forma más rápida que el módulo de la mezcla fabricada con betún modificado. Analizando ambas curvas se observa claramente una zona en la que el módulo decrece de forma más brusca para después estabilizarse. Para el caso de la mezcla fabricada con betún convencional, esta caída brusca del módulo comienza aproximadamente en los 50.000 ciclos. En el caso del betún modificado, donde el descenso del módulo es menos acusado, se produce para un número de ciclos cercano a los 91.000. Estos valores coinciden con los obtenidos mediante el criterio de rotura establecido a partir de los valores de DED, lo que valida la adopción del criterio del 50% de la DED máxima como criterio de fallo para los ensayos de barrido de deformaciones.

2.2. Barrido de tiempo

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos de barrido de tiempo donde se aplican ciclos de carga a una amplitud de deformación constante hasta que se produce el fallo de la probeta. El objetivo de estos ensayos es la obtención de las leyes de fatiga de la mezcla seleccionada (tipo AC16S), para los dos tipos de ligante considerados, 50/70 y PMB 45/80-65. Para ambos casos, las probetas se han ensayado a una temperatura de 20°C y a una frecuencia de 10 Hz.

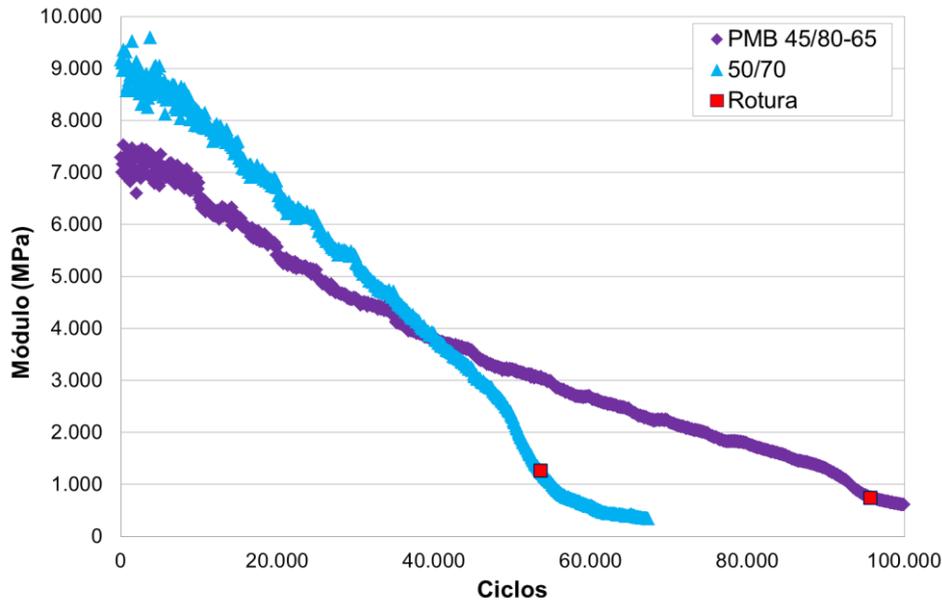


Figura 4.30. Evolución del módulo con el número de ciclos. Ensayo EBADE a 20°C y 10 Hz.

En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de barrido de tiempo a tracción compresión, empleando la misma geometría de probeta que la empleada en el ensayo EBADE. Las distintas amplitudes de deformación utilizadas se han hecho coincidir con las amplitudes de deformación de los escalones del ensayo EBADE. Así, para la mezcla fabricada con betún convencional, las amplitudes de deformación consideradas coinciden con las deformaciones correspondientes a los escalones de deformación 3, 4, 5, 7 y 9 del ensayo EBADE realizado con anterioridad. En el caso de la mezcla fabricada con betún modificado, los escalones de deformación considerados son los correspondientes al 7, 9, 11, 14 y 17.

La Figura 4.31 muestra la variación del módulo para la mezcla fabricada con betún 50/70 (arriba) y betún PMB 45/80-65 (abajo) durante el ensayo de barrido de tiempo, de una probeta representativa para cada amplitud de deformación considerada. Estas curvas módulo-ciclos obtenidas a partir de los ensayos de barrido de tiempo, a diferentes niveles de deformación, han sido utilizadas para obtener las leyes de fatiga clásicas de la mezcla fabricada con cada ligante considerado. Para ello se ha empleado el criterio convencional de fallo, que establece el fallo en el ciclo en el cual el módulo es igual al 50% del módulo inicial. La Figura 4.32 muestra las leyes de fatiga obtenidas mediante este criterio. Las leyes son prácticamente paralelas (con la misma pendiente) situándose la de betún convencional, de mayor módulo, por debajo de la correspondiente al betún modificado.

No obstante, al analizar la variación del módulo con el número de ciclos en la Figura 4.31, se observa que en ninguno de los casos, con el criterio convencional de fallo, se está determinando el número de ciclos que soporta la mezcla cuando ésta rompe. A modo de ejemplo la Figura 4.33 muestra la obtención del número de ciclos hasta fallo para la mezcla fabricada con betún

modificada ensayada a una deformación de $275 \mu\text{m/m}$ con el criterio de fallo clásico, que parece estar muy alejado del punto en que realmente rompe la probeta, cuando el módulo decrece bruscamente. Por ello, se ha procedido a comparar este criterio de fallo con algunos de los descritos a lo largo de la literatura.

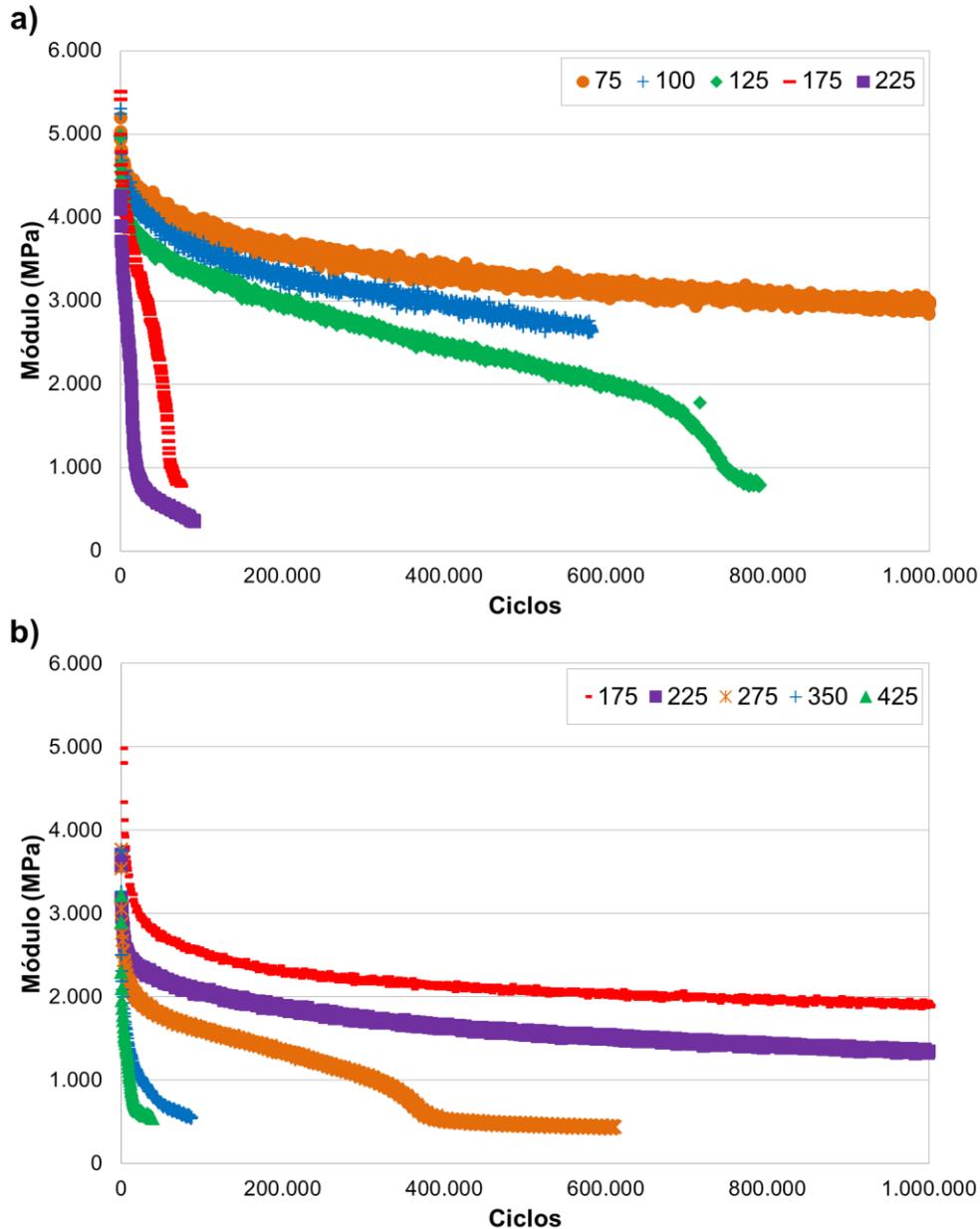


Figura 4.31. Evolución del módulo de una probeta representativa en el ensayo de barrido de tiempo para los diferentes escalones de deformación: a) betún 50/70 y b) PMB 45/80-65.

El primer criterio de fallo con el que se va a comparar el criterio convencional es el criterio de fallo definido por Baaj, *et al.* [273], basado en la diferenciación del módulo complejo en tres fases o etapas a lo largo del número de ciclos. En la Fase I se produce un descenso muy importante y brusco del módulo dinámico. En la Fase II, el módulo decrece de una forma lineal, cuya pendiente dependerá de la amplitud de deformación aplicada. Por último, en la Fase III se

produce un descenso súbito del módulo, el cual se asocia a la interconexión de macrofisuras, las cuales progresan rápidamente hasta el fallo total de la mezcla. El fallo de la probeta se establece para el número de ciclos en el que el comportamiento del material pasa de ser lineal a experimentar una caída brusca, Fase III (Figura 4.34). Este criterio es mucho más fiable que el criterio clásico, basado en la reducción relativa del 50% del módulo respecto a su valor inicial.

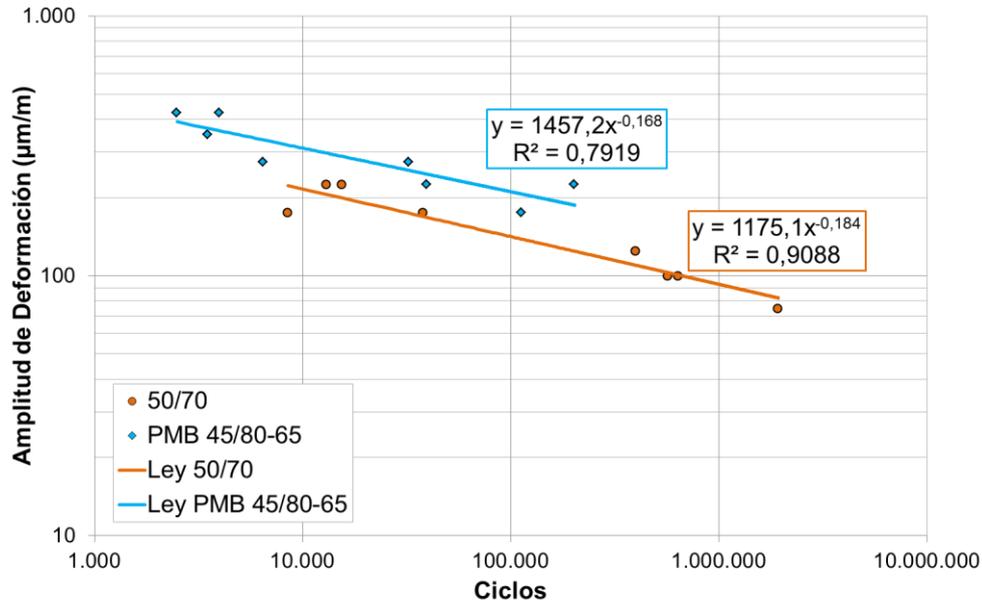


Figura 4.32. Leyes de fatiga a partir del ensayo de barrido de tiempo.

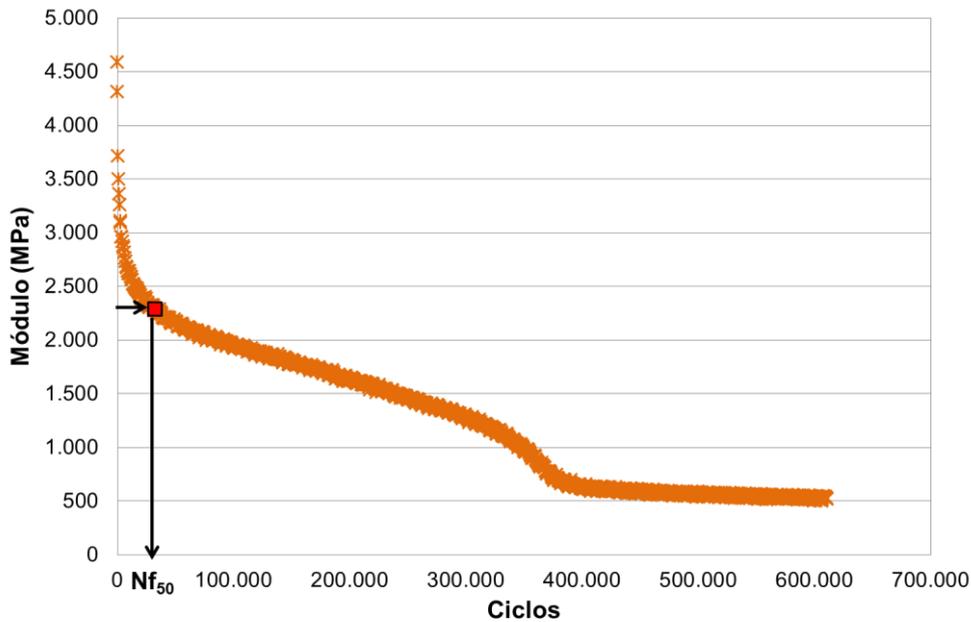


Figura 4.33. Evolución del módulo con el número de ciclos y fallo a partir del criterio convencional. Barrido de tiempo a deformación de 275 µm/m. Betún PMB 45/80-65.

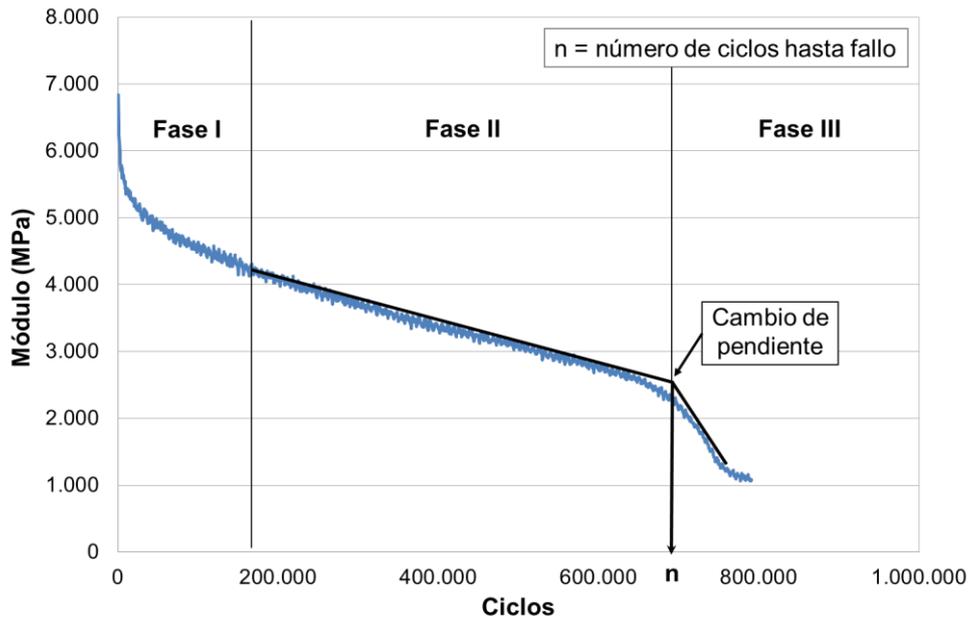


Figura 4.34. Diferenciación del módulo en tres fases y criterio de fallo [308].

El siguiente criterio es el definido para el ensayo EBADE basado en la evolución de la DED con el número de ciclos. En este caso, el fallo de la probeta se define como el número de ciclos en el que la DED máxima se reduce a la mitad. Al tratarse de un ensayo de barrido de tiempo, la DED se reduce a medida que progresa el ensayo, por lo cual, el criterio de fallo se puede definir como aquel en el que la DED inicial se reduce a la mitad (Figura 4.35).

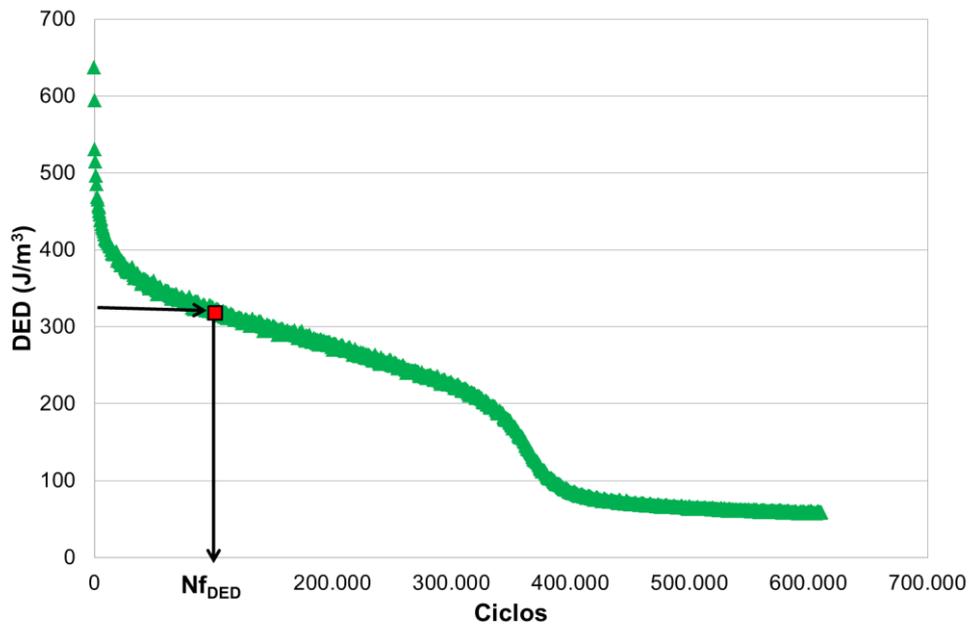


Figura 4.35. Evolución de la DED con el número de ciclos y fallo al 50% de la $DED_{máx}$. Barrido de tiempo a deformación de $275 \mu\text{m/m}$. Betún PMB 45/80-65.

El último criterio de fallo que se va a comparar en este apartado, al igual que el anterior, está basado en el concepto de energía disipada y se denomina ratio de cambio de energía disipada (*Ratio of Dissipated Energy Change*, RDEC) [274, 312, 313]. Este ratio se define como el cambio en la energía disipada entre dos ciclos de carga (Figura 4.36). Así, definen el fallo como el punto de transición donde este ratio (RDEC) comienza a aumentar drásticamente. De este modo, si se dibuja la diferencia entre el área bajo la curva de energía disipada (SDE) (Figura 4.37) y el área trapezoidal (AT) obtenida al unir la energía disipada inicial con la energía disipada en cada ciclo (Figura 4.38) frente al número de ciclos (ΔA), se obtiene un valor máximo (Figura 4.39) que corresponde al número de ciclos para el cual la mezcla rompe (Nfm).

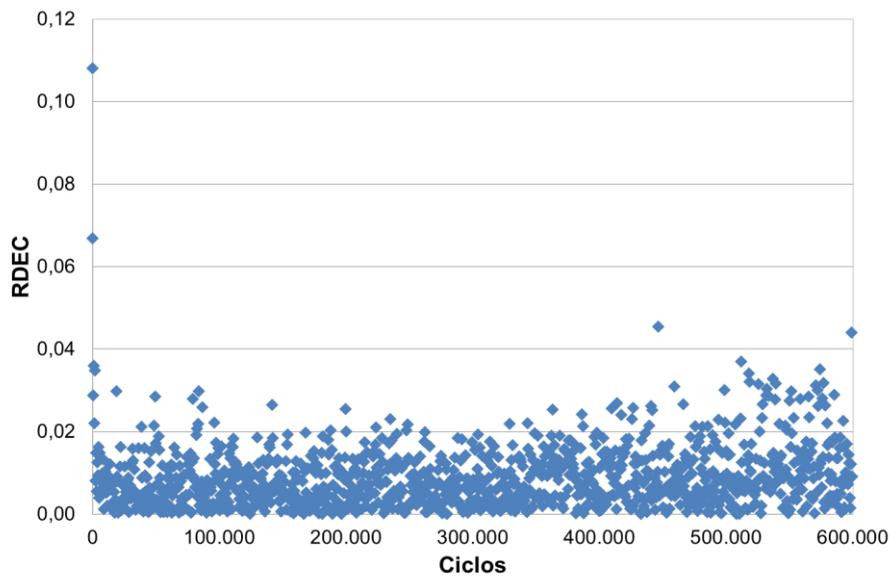


Figura 4.36. Evolución del ratio de cambio de la energía disipada (RDEC).

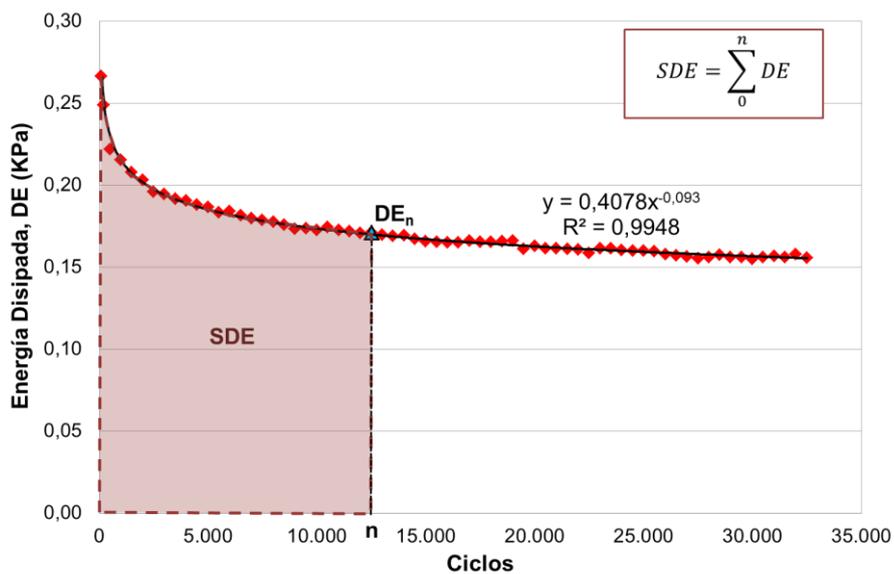


Figura 4.37. Cálculo del área bajo la curva de energía disipada (SDE). Barrido de tiempo a deformación 275 $\mu\text{m/m}$.
Betún PMB 45/80-65.

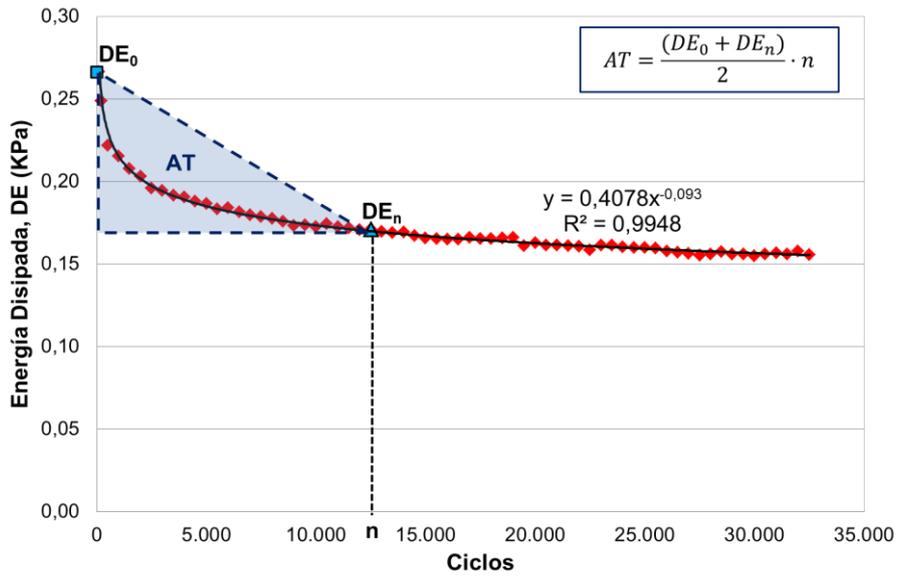


Figura 4.38. Cálculo del área trapezoidal (AT) obtenido al unir la energía disipada inicial con la energía disipada en cada ciclo. Barrido de tiempo a deformación 275 $\mu\text{m/m}$. Betún PMB 45/80-65.

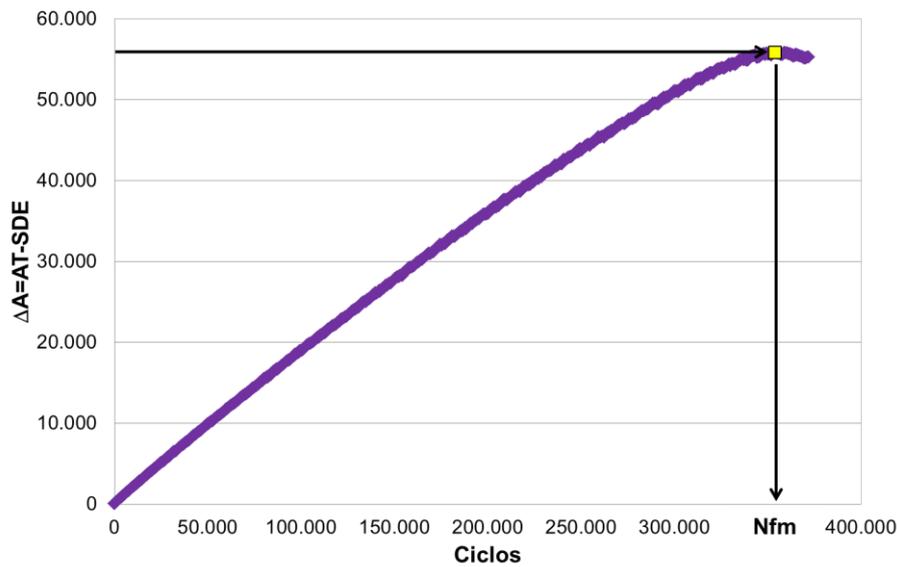


Figura 4.39. Evolución de ΔA con el número de ciclos y fallo a partir del criterio de fallo RDEC. Barrido de tiempo a deformación 275 $\mu\text{m/m}$. Betún PMB 45/80-65.

La Figura 4.40 muestra las leyes de fatiga para la mezcla fabricada con betún convencional obtenidas a partir de los distintos criterios de fallo definidos. Igualmente, la Figura 4.41 muestra las leyes de fatiga para la mezcla fabricada con betún modificado. Comparando los resultados para ambos tipos de ligante, se observa que para la mezcla con el betún convencional, menos deformable que la mezcla con el betún modificado (Figura 4.42), se obtienen leyes de fatiga más similares para los distintos criterios de fallo, habiendo mayores diferencias entre las leyes de fatiga para la mezcla fabricada con betún modificado. Esto indica que para mezclas más rígidas, las diferencias entre distintos criterios de fallo son menores.

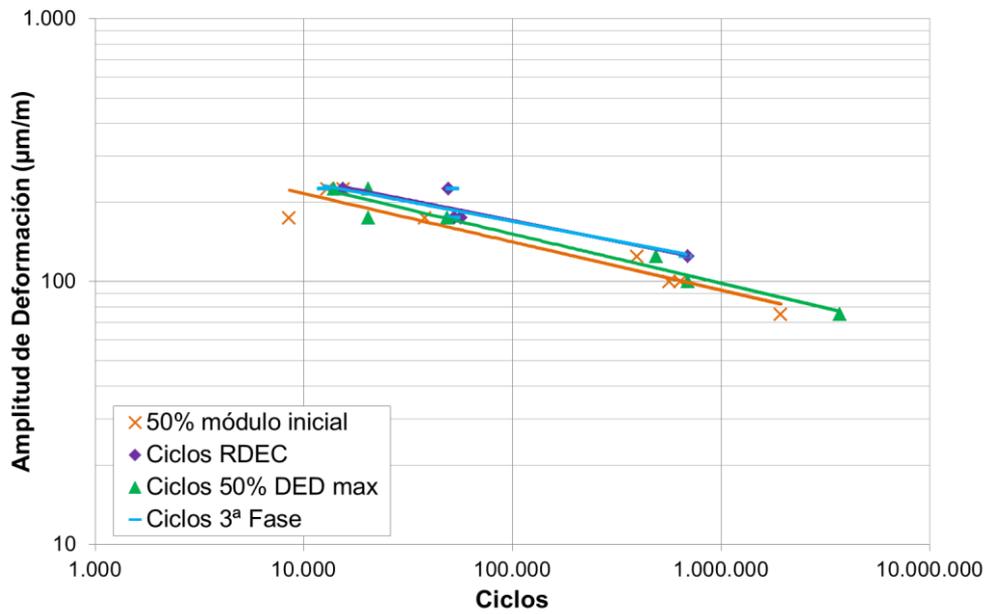


Figura 4.40. Leyes de fatiga obtenidas a partir de los distintos criterios de fallo considerados. Betún 50/70.

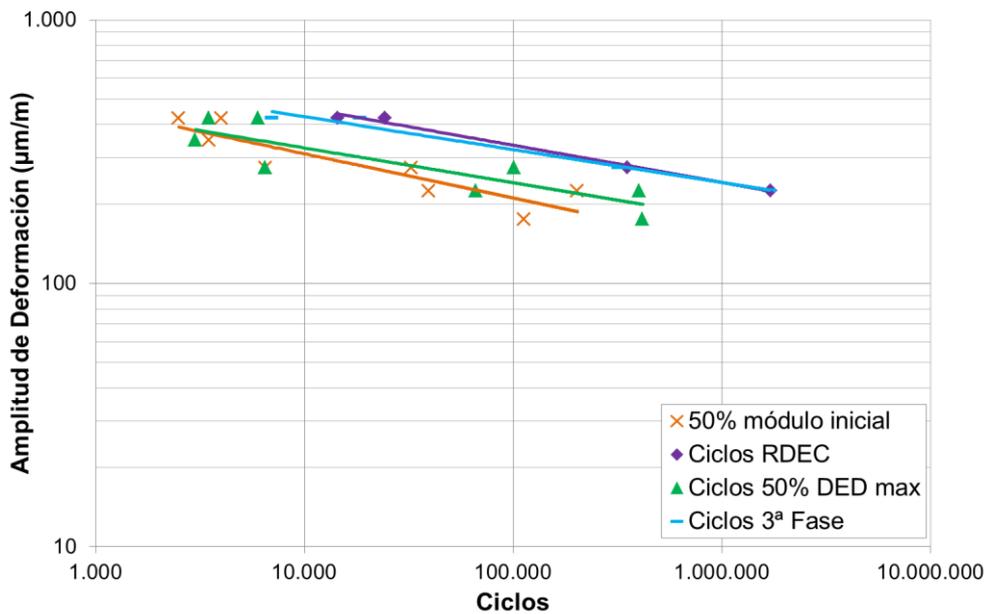


Figura 4.41. Leyes de fatiga obtenidas a partir de los distintos criterios de fallo considerados. Betún PMB 45/80-65.

Comparando las leyes de fatiga en función de los diferentes criterios de fallo, el criterio de fallo para el 50% del módulo inicial es el más restrictivo, seguido por el criterio del 50% de la DED máxima, el criterio de rotura en el punto de transición de la segunda a la tercera fase y, por último, el criterio del RDEC, aunque para estos dos últimos criterios los resultados son muy similares.

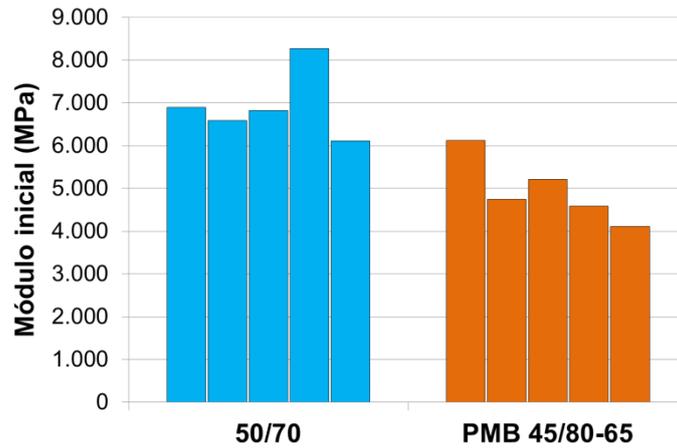


Figura 4.42. Módulo inicial promedio para los diferentes escalones de deformación considerados en el cálculo de las leyes de fatiga. Betunes 50/70 y PMB 45/80-65.

Aunque el criterio de fallo al 50% del módulo inicial es el más restrictivo, si se analiza la evolución del módulo se observa que, en la mayoría de los casos, la mezcla no ha roto, dando resultados erróneos en el cálculo de las leyes de fatiga, igual que ocurre en el caso del criterio del 50% de la DED máxima. Este hecho es especialmente notable para el caso de la mezcla fabricada con betún modificado debido a que el módulo, para este tipo de mezcla, tiende a caer rápido en los primeros ciclos de carga del ensayo. Sin embargo, la mezcla es capaz de soportar un número importante de ciclos antes de producirse su rotura (Figura 4.43). Por este motivo, para representar las leyes de fatiga en los ensayos de barrido de tiempo se ha escogido como criterio de fallo el punto en que se produce la transición del módulo de la II a la III Fase (Figura 4.44).

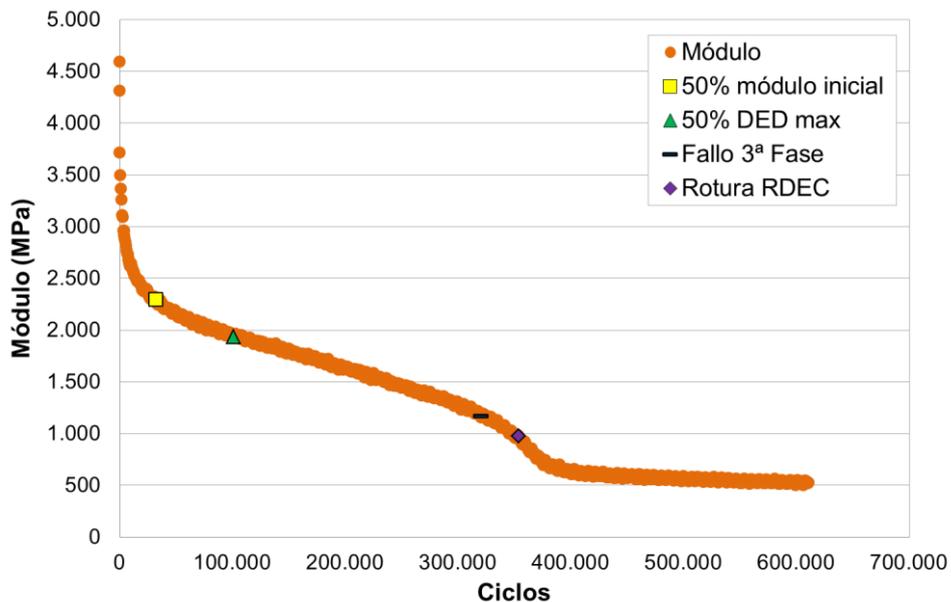


Figura 4.43. Evolución del módulo con el número de ciclos. Diferentes criterios de fallo considerados. Barrido de tiempo a 275 $\mu\text{m}/\text{m}$. Betún PMB 45/80-65.

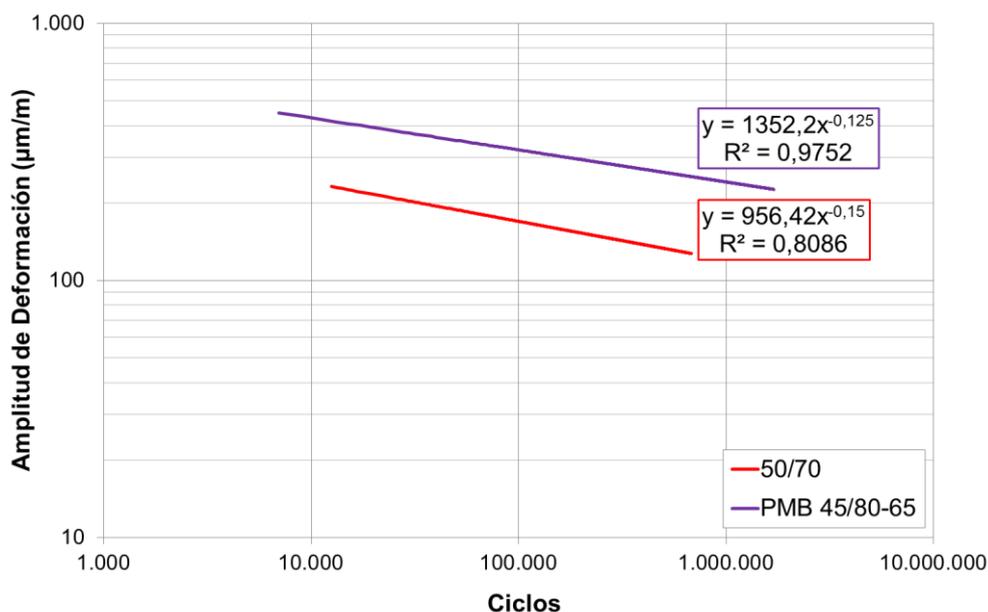


Figura 4.44. Leyes de fatiga a partir del criterio de fallo de la 3ª Fase del módulo. Mezcla fabricada con betún 50/70 y PMB 45/80-65.

2.3. Comparación entre barrido de tiempo y barrido de deformaciones

En esta sección se presenta un análisis comparativo de los resultados obtenidos mediante el ensayo de barrido de tiempo a tracción-compresión y el ensayo de barrido de deformaciones EBADE. Los ensayos de barrido de deformaciones, al igual que los de barrido de tiempo, se han realizado a una temperatura de 20°C y una frecuencia de 10 Hz. Se han ensayado un mínimo de cinco probetas por cada tipo de betún, por lo que se presentan las curvas de los resultados de una probeta representativa.

Las gráficas de la Figura 4.45 muestran la evolución del módulo en los ensayos de barrido de tiempo para cada nivel de deformación considerado, y en el ensayo de barrido de deformaciones para la mezcla fabricada con cada uno de los ligantes. En primer lugar, se observa que la evolución del módulo en el ensayo EBADE es diferente a la observada en los ensayos de barrido de tiempo. Al aumentar la deformación aplicada cada 5.000 ciclos, el módulo decrece de forma acelerada con respecto a la evolución de este en un ensayo de barrido de tiempo. En segundo lugar, se aprecia que, cuando la deformación en el ensayo EBADE coincide con la deformación aplicada en el ensayo de barrido de tiempo, la pendiente del módulo pasados 5.000 ciclos (al final del escalón del ensayo EBADE) coincide con la pendiente del módulo en el ensayo de barrido de tiempo.

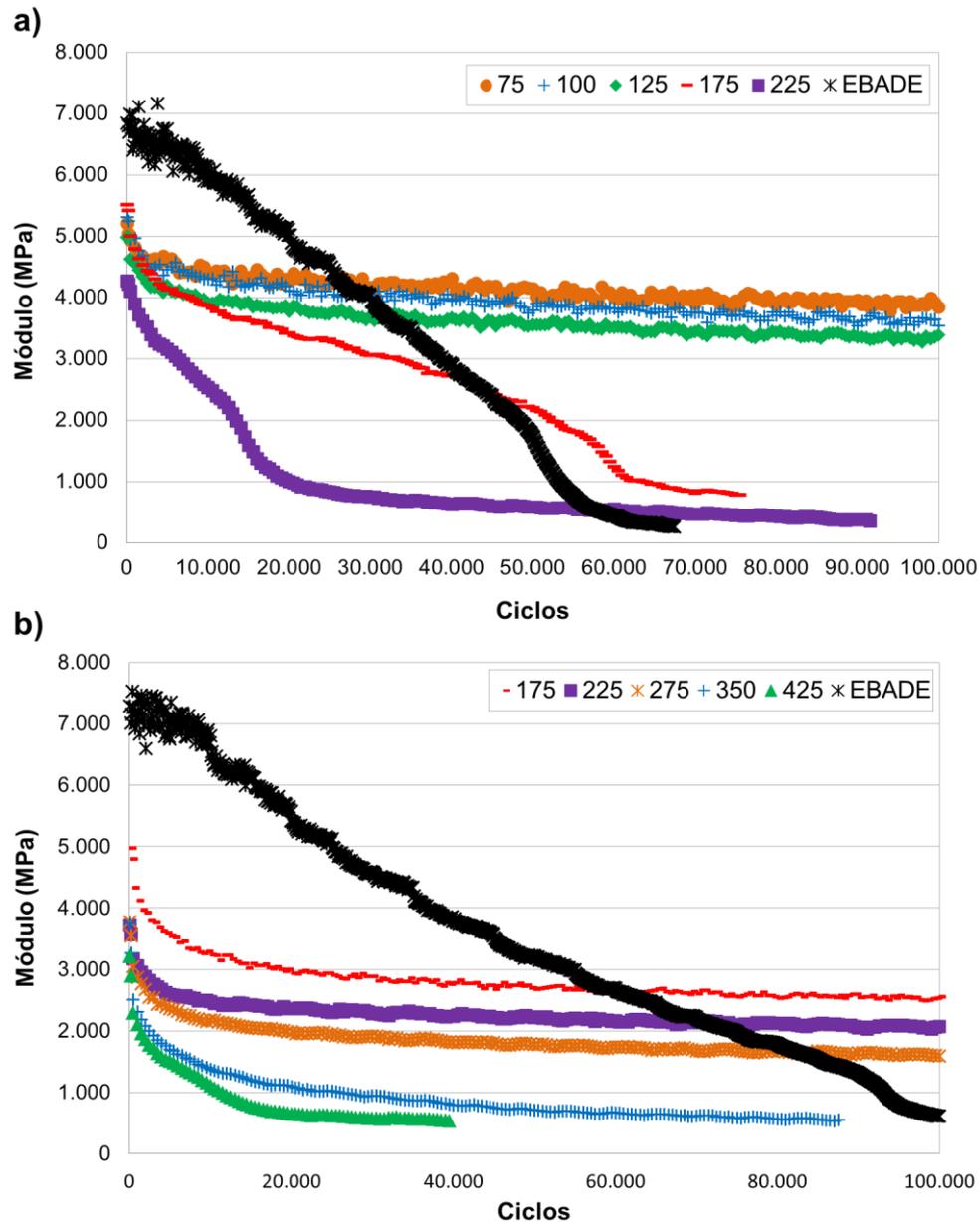


Figura 4.45. Comparativa de la evolución del módulo en el ensayo de barrido de tiempo y en el ensayo de barrido de deformaciones: a) 50/70 y b) PMB 45/80-65.

Igualmente la Figura 4.46 muestra las gráficas comparativas de la DED en los ensayos de barrido de tiempo y de barrido de deformaciones para la mezcla fabricada con los dos tipos de ligante considerados. Al igual que en la evolución del módulo, se observa que la tendencia de la DED en el ensayo EBADE es diferente a la observada en los ensayos de barrido de tiempo. Esto se debe a que el ensayo EBADE combina dos métodos de degradación, la repetición de ciclos de carga y el aumento de la deformación. Sin embargo, se observa que, para un mismo escalón de deformación, la pendiente de la DED en ambos ensayos tiende a ser similar, así para escalones de deformación pequeños la DED tiende a mantenerse constante mientras que para escalones de deformación mayores la DED disminuye significativamente.

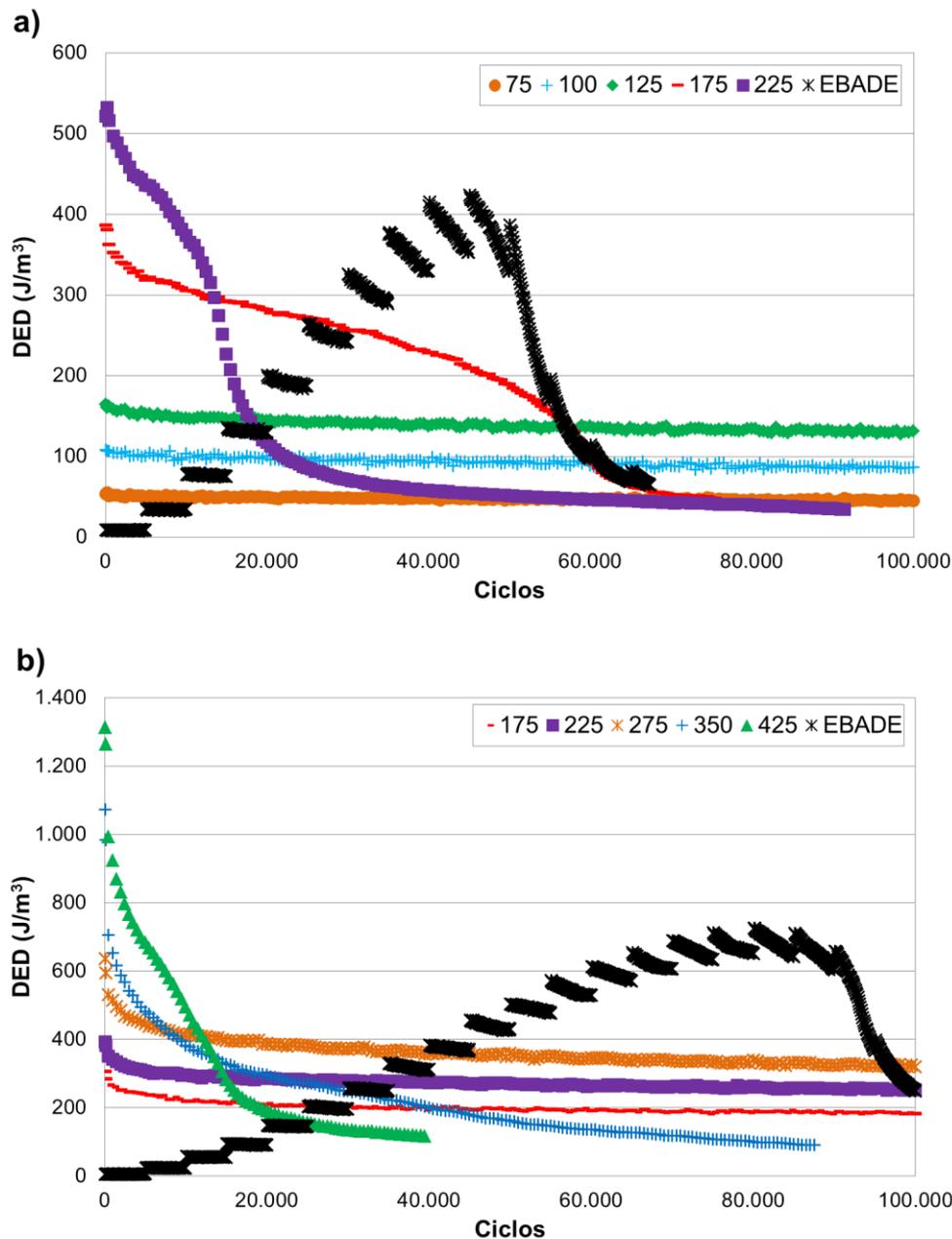


Figura 4.46. Comparativa de la evolución de la DED en el ensayo de barrido de tiempo y en el ensayo de barrido de deformaciones: a) 50/70 y b) PMB 45/80-65.

La Figura 4.47 muestra la variación de la DED con respecto al módulo para los ensayos de barrido de tiempo y barrido de deformaciones de la mezcla fabricada con betún convencional, y para la mezcla fabricada con betún modificado. Para ambas mezclas se observa que la pendiente de la línea producida en cada nivel de deformación considerado en el ensayo de barrido de deformaciones prácticamente coincide con la pendiente producida en el ensayo de barrido de tiempo para el mismo nivel de deformación. Esto demuestra que el valor inicial y final de tanto el módulo como la DED en el ensayo EBADE coinciden con los valores del ensayo de barrido de tiempo para un mismo nivel de deformación. Este hecho es un indicador de la relación existente entre ambos ensayos, lo cual permite estudiar su posible correlación.

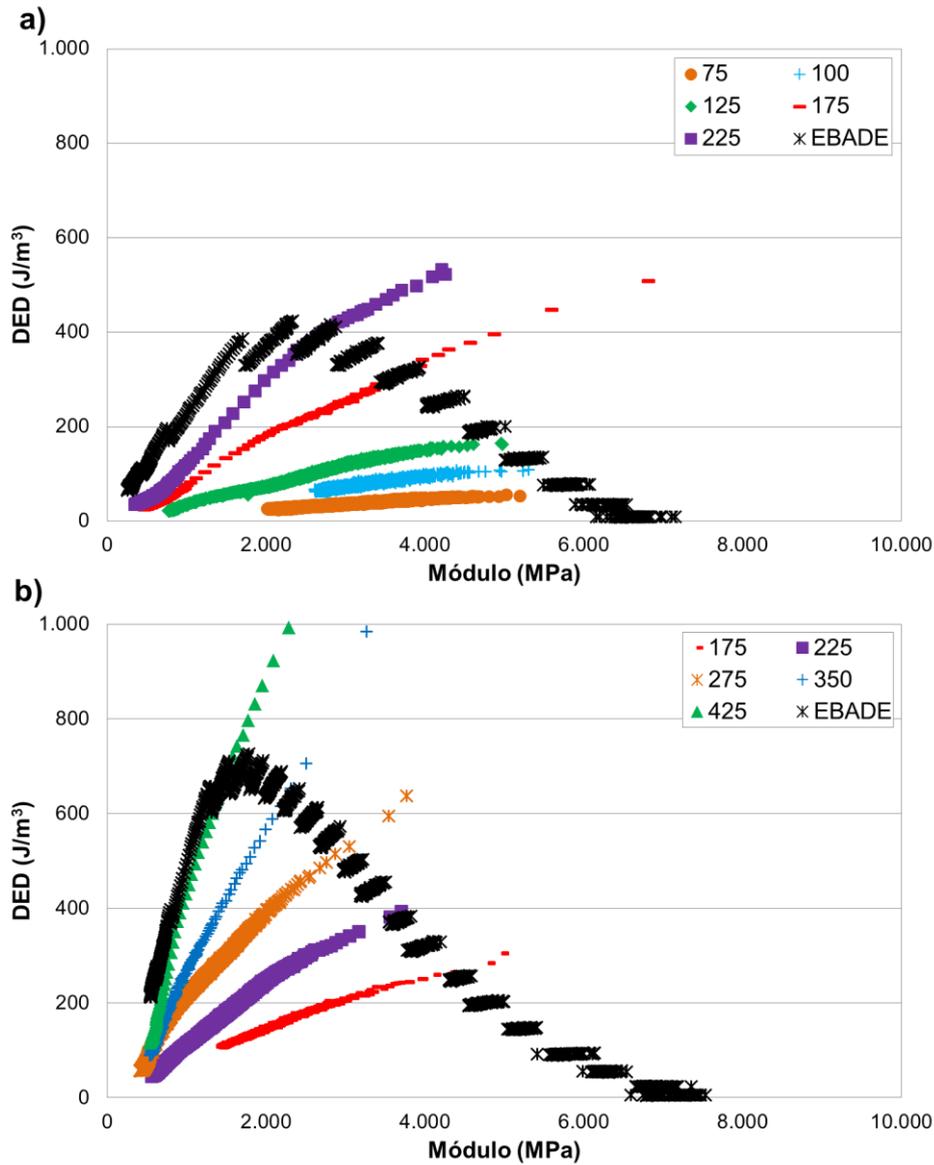


Figura 4.47. Variación de la DED respecto al módulo en el ensayo de barrido de tiempo y en el ensayo de barrido de deformaciones: a) Betún 50/70 y b) Betún PMB 45/80-65.

Sabiendo que existe una relación entre el ensayo de barrido de tiempo, mediante el cual es posible obtener las leyes de fatiga de la mezcla, se intuye que a partir del ensayo de barrido de deformaciones, EBADE, es posible obtener una ley de fatiga similar. A continuación, se presenta la metodología desarrollada para estimar las leyes de fatiga a partir del ensayo EBADE.

2.4. Estimación de las leyes de fatiga a partir del ensayo EBADE

El ensayo EBADE permite obtener en un solo ensayo información del comportamiento del material a diferentes niveles de deformación, obteniendo, por ejemplo, valores de deformación

que no producen daño al material y valores que inducen el fallo instantáneamente. Estas dos deformaciones permiten determinar el comportamiento a fatiga del material:

- La primera indica el nivel de deformación que necesitaría un gran número de aplicaciones de carga para producir el fallo del material, también llamado límite de fatiga (valor superior al número de aplicaciones del eje tipo que soporta el pavimento de una carretera con tráfico pesado y 30 años de servicio).
- El otro valor de la deformación es el que correspondería al fallo del material con muy pocas aplicaciones de carga, ya que según se ha visto en varios trabajos de investigación realizados en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña [269, 271], en los ensayos a tensión controlada el fallo de fatiga del material se produce en el mismo nivel de deformación, con independencia de la tensión inicial aplicada. Es decir, la deformación va evolucionando hasta llegar a la deformación de fallo, que tiene siempre el mismo valor, independientemente de que el fallo tenga lugar con muchas o con pocas aplicaciones de carga.

Ambos niveles de deformación se obtienen a partir del análisis de la variación de la DED con el número de ciclos (Figura 4.48). En la evolución de la DED se observa que en los primeros niveles de deformación este valor tiende a permanecer constante para un mismo escalón de deformación, no siendo hasta un cierto nivel de deformación cuando la DED disminuye con el número de ciclos para un mismo escalón. El máximo nivel de deformación para el cual la DED permanece constante está relacionado con el nivel de deformación para el cual la probeta no romperá en un ensayo de barrido de tiempo, o el fallo se producirá para un número de ciclos muy alto. Este valor de la deformación se ha denominado deformación de no fallo.

Una vez alcanzado el valor máximo de la DED, este parámetro cae bruscamente cuando la rotura tiene lugar. El criterio de rotura establecido es aquel en el cual la DED máxima se reduce a la mitad. La deformación correspondiente a este valor de DED se denomina deformación de fallo.

La determinación del escalón de deformación a partir del cual la DED comienza a disminuir es compleja, ya que el propio cálculo de la DED tiene un error asociado. Sin embargo, dado que la evolución de la DED en cada escalón es prácticamente lineal, la determinación de la deformación de no fallo se ha basado en el cálculo de la pendiente correspondiente a la regresión lineal producto del ajuste de los datos de DED de cada escalón. En los primeros escalones, esta pendiente debe ser cero y, a medida que aumenta la deformación, también lo hace esta variable.

El análisis de los resultados de las pendientes de la variación de la DED con el número de

ciclos ($\Delta\text{DED}/\Delta\text{Ciclos}$) para cada escalón de deformación, en diferentes tipos de mezclas, ha proporcionado un valor de la pendiente $\Delta\text{DED}/\Delta\text{Ciclos}$ límite para definir el comienzo de la pérdida de DED con el número de ciclos. Este límite se ha fijado en $1,0\text{E}-3 \text{ J/m}^3$. Por lo tanto, la deformación de no fallo se determina como la máxima amplitud de deformación en el ensayo EBADE para la cual la pendiente $\Delta\text{DED}/\Delta\text{Ciclos}$ es menor a $1,0\text{E}-3 \text{ J/m}^3$. A modo de ejemplo, la Figura 4.49 representa la evolución de esta pendiente para cada escalón de deformación para la mezcla AC16S no acondicionada fabricada con un betún convencional, 50/70, y con otro modificado, PMB 45/80-65, ensayados a 20°C.

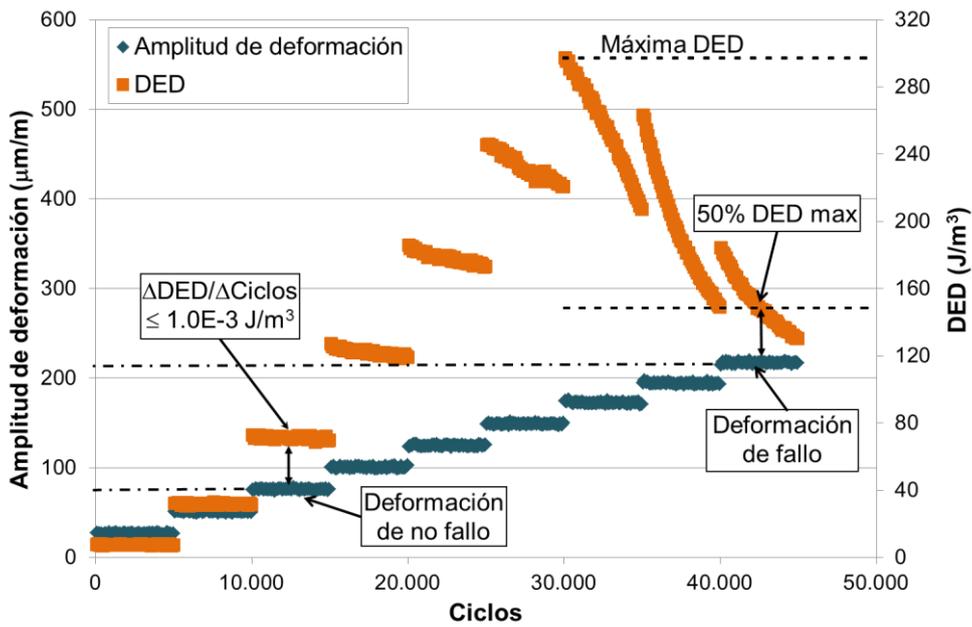


Figura 4.48. Ejemplo de la determinación de la deformación de no fallo y de fallo a partir de los valores de DED del ensayo EBADE [314].

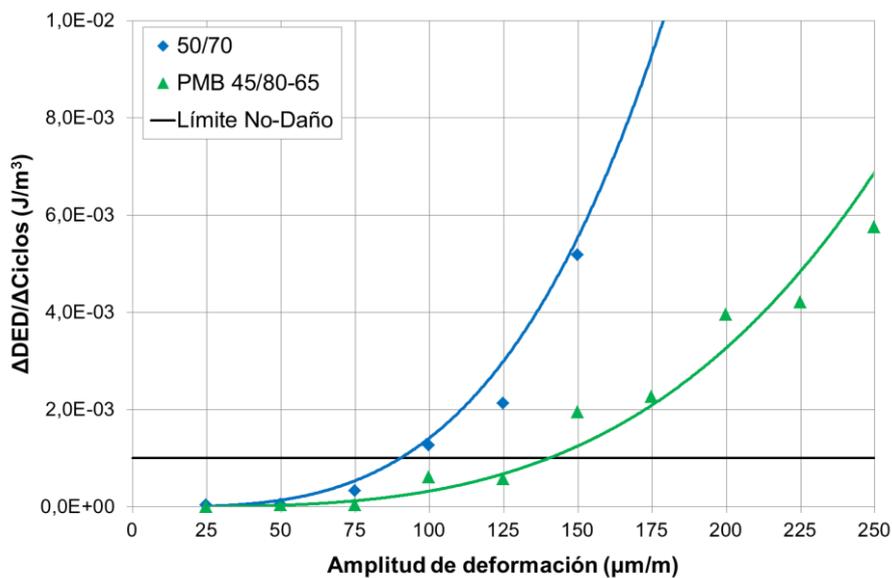


Figura 4.49. Evolución de la pendiente $\Delta\text{DED}/\Delta\text{Ciclos}$ con la amplitud de deformación en el ensayo EBADE. Mezcla AC16S fabricada con betún 50/70 y con betún PMB 45/80-65.

La obtención de la deformación de no fallo y de fallo para una determinada mezcla se puede emplear para estimar una ley de fatiga teórica. Para ello, debe determinarse si el número de ciclos hasta fallo corresponde a un ensayo muy largo (deformación baja) o a un ensayo muy corto (deformación alta). En investigaciones previas, la comparación entre ensayos EBADE y ensayos de barrido de tiempo ha mostrado que existe una correlación entre las deformaciones de fallo y no fallo con la duración de los ensayos clásicos de fatiga (barrido de tiempo). En concreto, se ha observado que los ensayos de barrido de tiempo realizados a la deformación de fallo determinada en ensayos EBADE tienen una duración entre 5.000 y 20.000 ciclos [315], mientras que los ensayos realizados a la deformación de no fallo han durado más de 2.000.000 de ciclos sin alcanzar el fallo [313].

Teniendo en cuenta estos resultados, se han fijado dos valores de número de ciclos para la deformación de no fallo (10.000.000 ciclos) y la deformación de fallo (10.000 ciclos) con el objetivo de estimar la ley de fatiga teórica del material.

A modo de ejemplo, en la Figura 4.50 se muestran las leyes de fatiga a 20°C estimadas a partir del ensayo EBADE, comparándolas con las leyes de fatiga obtenidas mediante el ensayo de barrido de tiempo en tracción-compresión con la misma geometría de probeta que el ensayo EBADE. Se observa que ambas leyes de fatiga, estimadas a partir de EBADE y obtenidas a partir del barrido de tiempo, se encuentran muy próximas para ambos casos, considerándose que el ajuste de la ley de fatiga estimada a partir del ensayo EBADE con las leyes de fatiga a partir de un ensayo clásico de fatiga es aceptable.

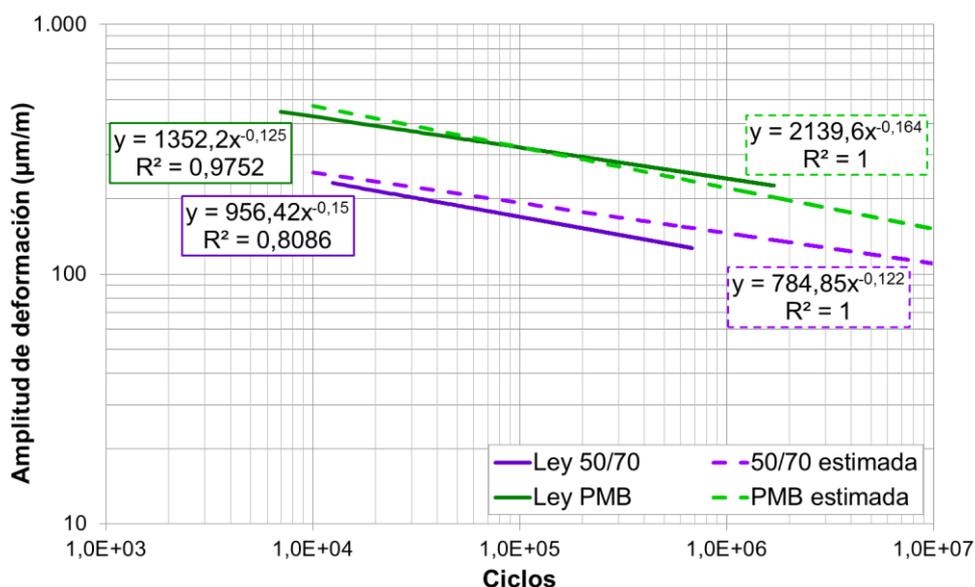


Figura 4.50. Leyes de fatiga obtenidas mediante el ensayo de barrido de tiempo frente a las leyes estimadas a partir del ensayo EBADE. Mezcla AC16S fabricada con 50/70 y PMB 45/80-65.

El criterio de fallo empleado para la determinación de las leyes de fatiga en el ensayo de barrido de tiempo se ha basado en la diferenciación de la evolución del módulo complejo con el número de ciclos en tres fases o etapas (Figura 4.34). Como ya se ha visto, este criterio es mucho más fiable que el criterio clásico, basado en la reducción relativa del 50% del módulo, respecto a su valor inicial.

Este procedimiento para estimar las leyes de fatiga, permite su obtención de una forma más rápida. De esta forma, es posible estudiar el comportamiento a fatiga de mezclas sometidas a diferentes acondicionamientos, temperaturas de ensayo, etc. Así, se han obtenido las leyes de fatiga de la mezcla AC16S fabricada con los betunes 50/70 y PMB 45/80-65 bajo distintos acondicionamientos (envejecimiento y/o humedad) ensayada a una temperatura de 20, 5 y -5°C. La Tabla 4.38 presenta los resultados de los valores promedio del módulo inicial y de la deformación de fallo de las mezclas no acondicionadas y envejecidas. No se muestran los resultados en mezclas sometidas a daño por humedad (envejecidas o sin envejecer) porque, como se ha mostrado anteriormente, el agua apenas tiene efecto sobre este tipo de mezcla y los resultados son similares a las mezclas no acondicionadas o envejecidas, según el caso. Los valores de módulo inicial y deformación de fallo ponen de manifiesto que el módulo aumenta al envejecer la mezcla y al disminuir la temperatura de ensayo. En cuanto a la deformación de fallo, ésta tiende a disminuir al aumentar los valores del módulo inicial, es decir, la mezcla se rigidiza por efecto del envejecimiento y por la disminución de temperatura provocando una rotura más frágil para una menor deformación.

Tabla 4.38. Valores promedio de los resultados obtenidos a partir del ensayo EBADE para la mezcla AC16S.

Temperatura ensayo (°C)	Betún	Acondicionamiento	Módulo inicial (MPa)	Deformación fallo (µm/m)
20	50/70	No acondicionadas	8.013	264
		Envejecidas	14.192	185
	PMB 45/80-65	No acondicionadas	6.479	471
		Envejecidas	11.457	343
5	50/70	No acondicionadas	18.983	126
		Envejecidas	22.179	79
	PMB 45/80-65	No acondicionadas	15.214	180
		Envejecidas	18.985	87
-5	50/70	No acondicionadas	26.645	98
		Envejecidas	25.286	88
	PMB 45/80-65	No acondicionadas	18.925	121
		Envejecidas	21.631	69

La Figura 4.51 representa la evolución de los valores de DED con respecto al número de ciclos de los diferentes casos de estudio: mezcla no acondicionada o envejecida fabricada con betún convencional o con betún modificado, ensayadas a diferentes temperaturas (20, 5 y -5°C).

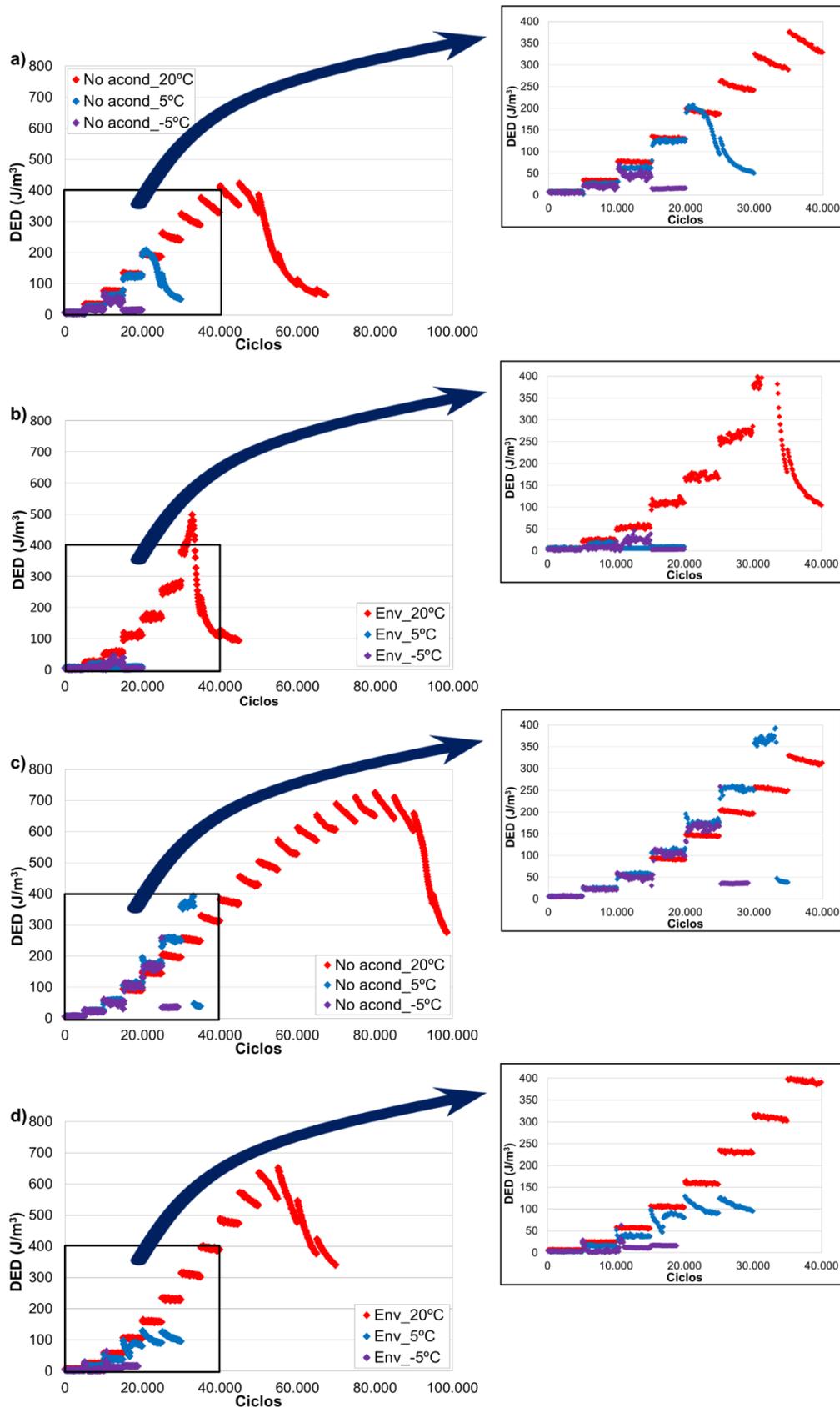


Figura 4.51. Evolución de la DED con el número de ciclos de una probeta representativa de los distintos casos de estudio: a) mezcla no acondicionada fabricada con betún 50/70, b) mezcla envejecida fabricada con 50/70, c) mezcla no acondicionada fabricada con betún PMB 45/80-65 y d) mezcla envejecida fabricada con PMB 45/80-65.

Temperaturas de ensayo: 20, 5 y -5°C.

Las variaciones observadas en la DED ya están indicando variaciones en la vida a fatiga de la mezcla. Así, al disminuir la temperatura de ensayo, la DED disminuye. La curva tiende a desplazarse hacia la izquierda, es decir, la mezcla es capaz de soportar un menor número de ciclos antes de su rotura. Además, una vez la mezcla falla, la DED tiende a caer de forma más rápida. Este comportamiento es similar al observado en la mezcla cuando la misma se envejece, lo cual está indicando que, tanto a temperaturas bajas como por efecto del envejecimiento, la mezcla se rigidiza y se comporta de manera más frágil. Al comparar el comportamiento de la mezcla en función del tipo de ligante, se observa que la mezcla fabricada con un betún modificado presenta un mejor comportamiento, el cual viene definido por un valor más alto de la DED máxima y un mayor número de ciclos, y por lo tanto, un nivel de deformación de rotura más alto.

A partir de las curvas de DED se pueden obtener los valores de deformación de no fallo y de deformación de fallo definidos para el ensayo EBADE, los cuales se presentan en la Tabla 4.39.

Tabla 4.39. Valores de deformación de no fallo y deformación de fallo promedio de los obtenidos a partir de los resultados del ensayo EBADE.

Betún	Acondicionamiento	T (°C)	$\epsilon_{\text{no fallo}} (\mu\text{m/m})$	$\epsilon_{\text{fallo}} (\mu\text{m/m})$
50/70	No acondicionadas	20	119	264
		5	65	132
		-5	54	86
	Envejecidas	20	123	156
		5	63	87
		-5	55	77
PMB	No acondicionadas	20	152	471
		5	84	179
		-5	60	135
	Envejecidas	20	163	289
		5	51	87
		-5	43	70

Usando los valores de las dos deformaciones obtenidas a partir del ensayo EBADE, deformación de no fallo y deformación de fallo, se puede estimar una ley de fatiga teórica a partir de la cual analizar el comportamiento a fatiga de la mezcla en las distintas condiciones de estudio de la forma clásica.

La Figura 4.52 muestra las leyes de fatiga estimadas para la mezcla no acondicionada fabricada con betún convencional, a las distintas temperaturas de ensayo consideradas. Analizando las pendientes de las tres leyes de fatiga estimadas se puede predecir cuál será el comportamiento de la mezcla en los distintos casos de estudio. A -5°C la pendiente de la ley de fatiga es muy pequeña, lo que está indicando que se trata de una mezcla rígida que romperá de una forma frágil, lo cual ya lo indicaba la curva de DED en el ensayo EBADE. A medida que

aumenta la temperatura de ensayo, lo hace también la pendiente de la ley de fatiga, señal de que la mezcla es más flexible y, por lo tanto, su rotura será menos frágil.

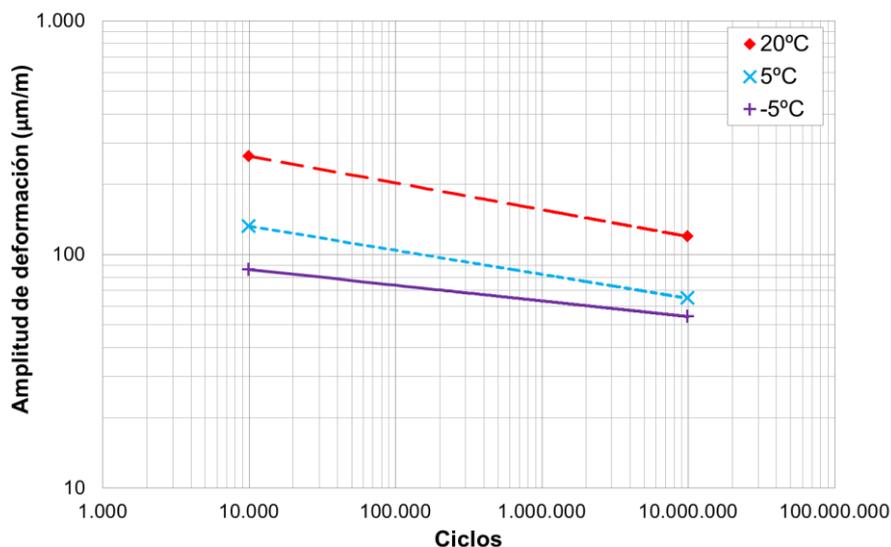


Figura 4.52. Leyes de fatiga estimadas. Temperaturas de ensayo: 20, 5 y -5°C. Mezcla no acondicionada con betún 50/70.

De la misma forma, se han obtenido las leyes de fatiga para la mezcla no acondicionada fabricada con un betún modificado con polímeros, Figura 4.53. Igualmente, los resultados para este tipo de betún indican un patrón de comportamiento similar al ensayar la mezcla a distintas temperaturas de ensayo. Sin embargo, si las leyes de fatiga para ambos tipos de betún son comparadas, se observa que la mezcla fabricada con betún modificado es capaz de soportar un mayor número de aplicaciones de carga para la misma deformación y bajo distintas temperaturas de ensayo.

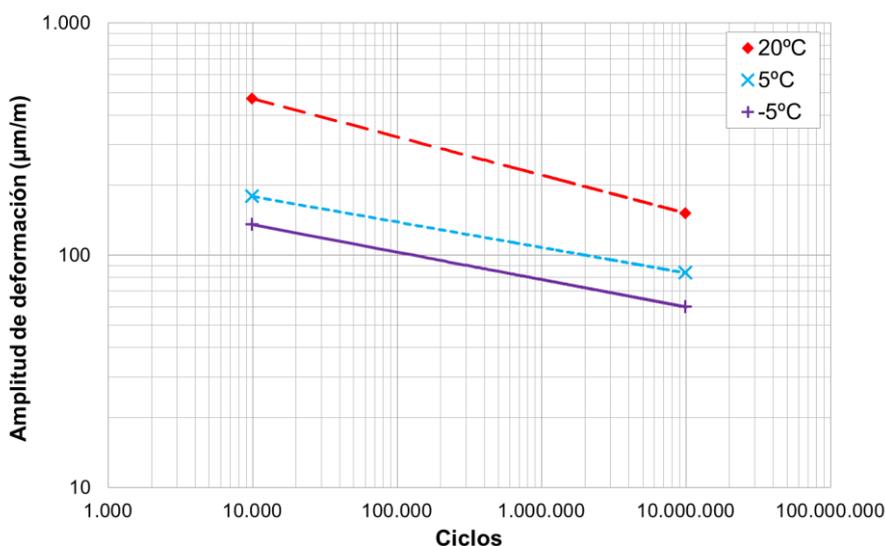


Figura 4.53. Leyes de fatiga estimadas. Temperaturas de ensayo: 20, 5 y -5°C. Mezcla no acondicionada con betún PMB 45/80-65.

Al envejecer la mezcla, las leyes de fatiga tienden a disminuir su pendiente disminuyendo también el número de aplicaciones de carga que la mezcla es capaz de soportar bajo una determinada deformación (Figura 4.54). Este comportamiento de la mezcla al envejecerse es similar al observado en la misma no acondicionada cuando se ensaya a temperaturas bajas, es decir, la mezcla aumenta su rigidez y, con ello, su fragilidad, tanto al someterla a temperaturas bajas como al envejecerla. Con las mezclas envejecidas se observa que a temperaturas medias (20°C) la mezcla fabricada con betún modificado presenta valores de deformación más altos para un mismo número de ciclos. Sin embargo, a temperaturas bajas se observa que las leyes de fatiga de la mezcla se encuentran muy próximas independientemente del tipo de ligante, siendo las diferencias entre una temperatura de 5 y de -5°C mínimas.

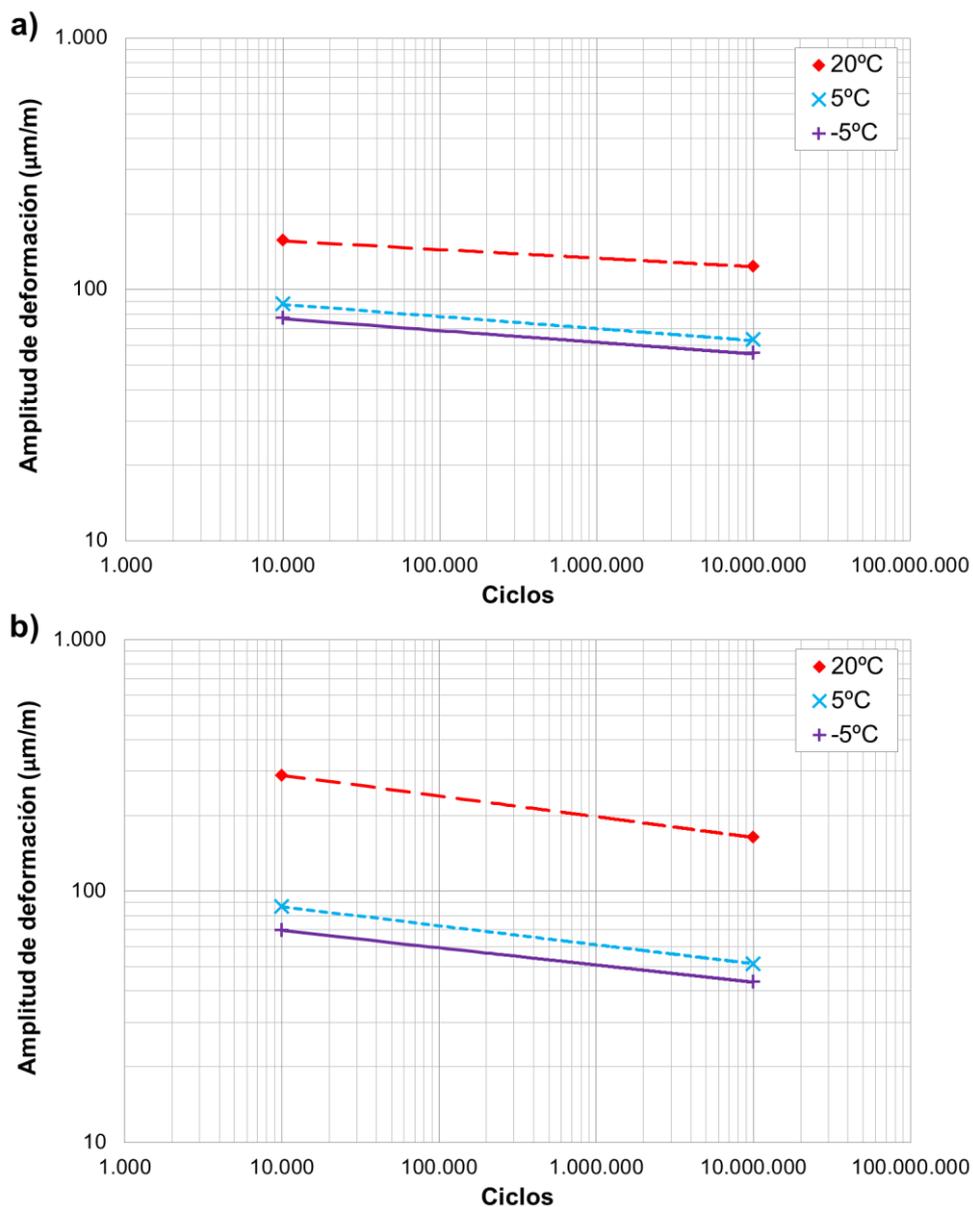


Figura 4.54. Leyes de fatiga estimadas para la mezcla envejecida: a) Mezcla con betún 50/70 y b) Mezcla con betún PMB 45/80-65. Temperaturas de ensayo: 20, 5 y -5°C.

A modo de resumen, en la Tabla 4.40 se muestran las leyes de fatiga estimadas a partir del ensayo EBADE para los distintos casos estudiados. Además, para cada ley de fatiga se ha calculado el parámetro ε_6 , definido como la amplitud de deformación para la cual el material resiste exactamente un millón de ciclos, parámetro de gran importancia que permite comparar el comportamiento a fatiga de diferentes materiales. Este parámetro corrobora de forma numérica las conclusiones obtenidas con las leyes de fatiga estimadas a partir del ensayo EBADE, es decir, el material es capaz de resistir una mayor amplitud de deformación para un mismo número de ciclos hasta fallo al usar un betún modificado, y además permite cuantificar cómo éste va empeorando a medida que se envejece y/o se ensaya a temperaturas bajas.

Tabla 4.40. Ecuaciones de las leyes de fatiga para los diferentes casos de estudio.

Betún	Acondicionamiento	T ^a (°C)	Ley de fatiga	ε_6 (10 ⁻⁶)
50/70	No acondicionadas	20	$N = 1,147 \cdot 10^{25} \cdot \varepsilon^{-8,697}$	163
		5	$N = 4,086 \cdot 10^{24} \cdot \varepsilon^{-9,719}$	79
		-5	$N = 6,499 \cdot 10^{32} \cdot \varepsilon^{-14,887}$	72
	Envejecidas	20	$N = 1,126 \cdot 10^{68} \cdot \varepsilon^{-29,197}$	125
		5	$N = 3,231 \cdot 10^{44} \cdot \varepsilon^{-20,869}$	52
		-5	$N = 2,784 \cdot 10^{44} \cdot \varepsilon^{-21,469}$	52
PMB	No acondicionadas	20	$N = 1,874 \cdot 10^{20} \cdot \varepsilon^{-6,087}$	218
		5	$N = 3,031 \cdot 10^{24} \cdot \varepsilon^{-9,090}$	109
		-5	$N = 1,112 \cdot 10^{22} \cdot \varepsilon^{-8,467}$	78
	Envejecidas	20	$N = 6,274 \cdot 10^{33} \cdot \varepsilon^{-12,109}$	190
		5	$N = 4,091 \cdot 10^{29} \cdot \varepsilon^{-13,219}$	70
		-5	$N = 7,811 \cdot 10^{30} \cdot \varepsilon^{-14,595}$	39

2.4.1. Aplicación de las leyes de fatiga en el cálculo analítico de firmes

A continuación se han considerado dos secciones firme, una con un espesor de mezcla elevado (sección 031 según la normativa española) y otra con poco espesor de mezcla (sección 4131), Figura 4.55. Suponiendo que las secciones están formadas por un sistema de capas horizontales de espesor uniforme, apoyadas sobre una base semi-infinita y utilizando las hipótesis de Burmister (elasticidad), es posible determinar el estado de tensiones/deformaciones producido por una carga tipo (eje simple de 13t, con ruedas gemelas) en la estructura.

La Tabla 4.41 muestra de forma resumida los resultados de la deformación horizontal bajo la capa de mezcla bituminosa para los dos tipos de betún considerados, suponiendo que su módulo es el módulo inicial registrado durante el ensayo EBADE (promedio de los valores de módulo en los 5.000 primeros ciclos). A partir de esta deformación, y con las leyes de fatiga de la mezcla anteriormente obtenidas, es posible determinar la vida a fatiga de la misma. Así, para el betún convencional y una sección de firme con un espesor de mezcla bituminosa elevado, la

vida a fatiga aumentaría al disminuir la temperatura y al envejecer la mezcla, ya que el módulo inicial de la misma es superior en estos casos y su efecto predomina sobre otros factores. Sin embargo, para una sección de firme menor, la vida a fatiga tiende a disminuir al bajar la temperatura y al envejecer la mezcla; en este caso, el efecto del módulo es mucho menor.

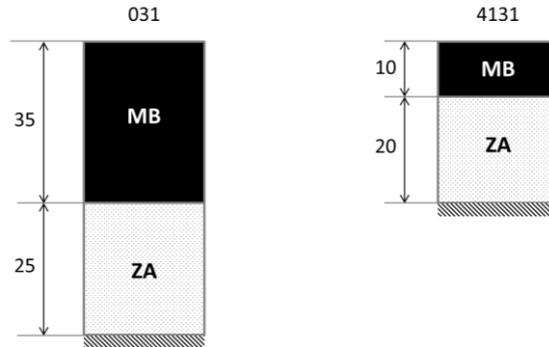


Figura 4.55. Secciones de firme consideradas (medidas en mm). MB: mezcla bituminosa y ZA: zahorra.

Tabla 4.41. Deformaciones horizontales y vida a fatiga calculados a partir de las leyes de fatiga.

Betún	Acondicionamiento	T ^a (°C)	Módulo inicial (MPa)	Sección 031		Sección 4131	
				ε (μm/m)	N	ε (μm/m)	N
50/70	No acondicionadas	20	8.013	57,1	6,05E+9	194	145.395
		5	18.983	28,7	2,77E+10	113	45.439
		-5	26.645	21,8	7,71E+12	89,5	5.702
	Envejecidas	20	14.192	36,3	3,21E+22	136	573.591
		5	21.769	25,7	1,21E+15	103	318
		-5	24.992	23	1,62E+15	93,5	135
PMB	No acondicionadas	20	6.479	67,4	1,39E+9	220	1,03E+6
		5	15.214	34,4	3,27E+10	130	184.433
		-5	17.762	30,3	3,18E+9	118	31.877
	Envejecidas	20	11.457	43,1	1,01E+14	156	1,74E+7
		5	18.985	28,7	2,19E+10	113	296
		-5	21.631	25,9	1,84E+10	103	32

No obstante, al calcular de esta forma la vida de las mezclas a partir de las leyes de fatiga se está suponiendo que el módulo va a permanecer constante a lo largo de todo el proceso de fatiga. Sin embargo, tanto en los ensayos de barrido de tiempo, como en los de barrido de deformaciones, el valor del módulo disminuye a medida que la mezcla se degrada. Por ello, la vida a fatiga va a depender del valor de este módulo a lo largo del proceso de degradación de la mezcla.

El ensayo EBADE permite obtener la variación del módulo en función de la deformación a la que estará sometida la mezcla. Por tanto, es posible aplicar un procedimiento iterativo que vaya considerando el valor del módulo para cada deformación, poniendo de manifiesto si una determinada sección puede resultar crítica en función de la temperatura a la que se encuentra y del grado de envejecimiento que tenga. Una vez calculada la deformación horizontal en función

del módulo de la mezcla y del tipo de firme, ésta equivale a un determinado escalón de deformación en el ensayo EBADE. Se ha observado que el valor del módulo al final de cada uno de los escalones de deformación considerados en el ensayo EBADE es similar al módulo que tendría la mezcla pasados 5.000 ciclos en un ensayo de barrido de tiempo a esa deformación. La Figura 4.56 demuestra la existencia de una relación lineal entre ambos valores. Por tanto, es posible determinar el módulo de la mezcla para la deformación horizontal obtenida en el cálculo de la vida a fatiga de la mezcla, y una vez obtenido este módulo es posible calcular de nuevo la vida a fatiga de la mezcla, esta vez considerando la degradación de la mezcla durante su vida a fatiga. Este proceso iterativo se repetirá hasta que el valor del módulo, y por lo tanto, el de la deformación horizontal se mantengan estables (Figura 4.57). En el caso de que la sección de la mezcla sea crítica, estos valores disminuirán hasta que la vida a fatiga de la mezcla sea prácticamente cero.

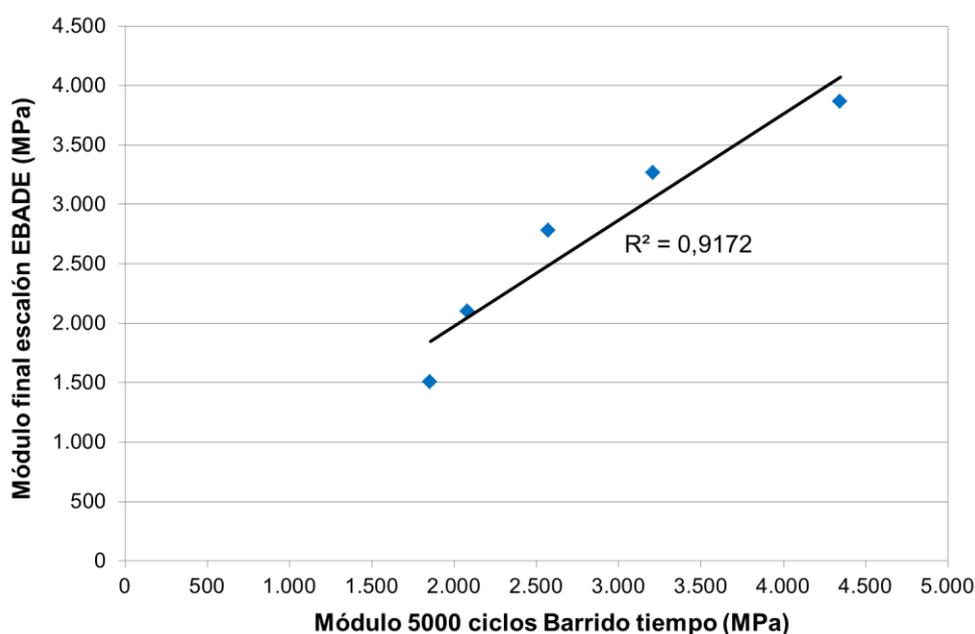


Figura 4.56. Relación entre el módulo en 5.000 ciclos en el ensayo de barrido de tiempo para una determinada deformación y el módulo al final del escalón de esa misma deformación en el ensayo EBADE.

En la Tabla 4.42 se recogen los resultados más interesantes obtenidos al aplicar el procedimiento iterativo en el cual el módulo varía durante la vida a fatiga de la mezcla. A partir de estos resultados se observan dos comportamientos diferenciados en función del valor del módulo inicial y final. Para la sección de menor espesor (4131), el valor del módulo disminuye drásticamente a lo largo del proceso iterativo, lo cual es indicador de que nos encontramos ante una sección crítica, la cual en pocos ciclos romperá. En cambio, el comportamiento de la sección de mayor espesor (031) será más estable, el módulo variará poco, y será capaz de soportar un gran número de ciclos hasta su rotura.

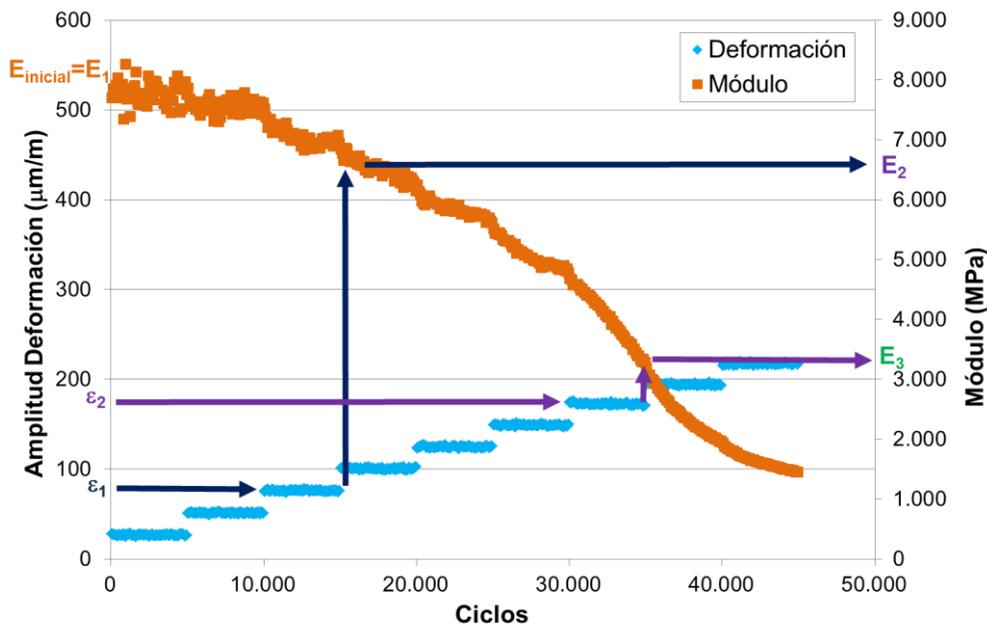


Figura 4.57. Ilustración del proceso iterativo seguido.

Analizando los resultados obtenidos usando el proceso iterativo donde se considera la evolución del módulo a lo largo de la vida de la mezcla, se observan una serie de hechos que hacen necesario ajustar este procedimiento. Así, en primer lugar, para una sección de espesor de mezcla bituminosa elevado, se observa que la vida de la mezcla envejecida es muy superior a la obtenida para la mezcla sin envejecer (no acondicionada). Los resultados de los ensayos realizados sobre probetas no envejecidas y envejecidas a distintas temperaturas evidencian que estos resultados no son lógicos. Es decir, la mezcla envejecida debería tener una vida menor que la mezcla sin envejecer. Para la sección de poco espesor, al aplicar el procedimiento iterativo, se obtiene, en la mayoría de los casos, un número de ciclos nulo, lo cual tampoco tiene sentido. A esto hay que añadir que en este procedimiento iterativo no se ha considerado el efecto del envejecimiento de la mezcla en la evolución del módulo: la mezcla no va a estar en su estado inicial durante toda su vida, y tampoco va a estar envejecida desde su puesta en servicio. Por este motivo, se ha procedido a calcular la vida a fatiga de la mezcla considerando el efecto del envejecimiento en la evolución del módulo y en las leyes de fatiga, ajustando el procedimiento iterativo anteriormente propuesto.

En primer lugar, se ha estimado el valor del módulo al final de los distintos escalones de deformación del ensayo EBADE para distintos grados de envejecimiento, promediando el valor del módulo de la mezcla no envejecida y el de la mezcla envejecida. Así, la Figura 4.58 muestra de forma visual la evolución del módulo de la mezcla fabricada con betún 50/70, ensayada a 20°C, cuando la mezcla no está envejecida y cuando está un 25, 50, 75 y 100% envejecida.

Tabla 4.42. Deformaciones y vida a fatiga obtenidos a partir del proceso iterativo.

Betón	Acondicionamiento	T (°C)	Módulo inicial (MPa)	Sección 031						Sección 4131					
				ε (µm/m)			N			ε (µm/m)			N		
				I	I _l	I _{final}	I	I _l	I _{final}	I	I _l	I _{final}	I	I _l	I _{final}
		20	8.013	2	7.022	57,1	63,3	6,05E+9	2,47E+9	4	102	194	2.830	145.395	0
	No acondicionadas	5	18.983	2	18.983	28,7	28,7	2,77E+10	2,77E+10	3	1.101	113	580	45.439	0
		-5	26.645	2	24.868	21,8	23,1	7,71E+12	3,25E+12	5	1.364	89,5	517	5.702	0
		20	14.192	2	13.206	36,3	38,5	3,21E+22	5,76E+21	4	953	136	627	573.591	0
	Envejecidas	5	21.769	3	21.769	25,7	25,7	1,21E+15	1,21E+15	2	4.513	103	271	318	0
		-5	24.992	2	24.493	23	23,4	1,62E+15	1,11E+15	3	3.062	93,5	336	135	0
		20	6.479	3	4.955	67,4	82,9	1,39E+9	3,93E+8	5	692	220	749	1,03E+6	596
	No acondicionadas	5	15.214	2	15.214	34,4	34,4	3,27E+10	3,27E+10	4	905	130	645	189.887	0
		-5	17.762	2	20.573	30,3	26,9	3,18E+9	8,72E+9	2	17.660	118	118	31.877	31.877
	PMB	20	11.457	2	10.773	43,1	45,2	1,01E+14	5,69E+13	5	5.417	156	245	1,74E+7	73.643
	Envejecidas	5	18.985	2	18.985	28,7	28,7	2,19E+10	2,19E+10	3	13.427	113	141	296	15
		-5	21.631	3	21.631	25,9	25,9	1,84E+10	1,84E+10	2	1.269	103	538	32	0

I: iteraciones.

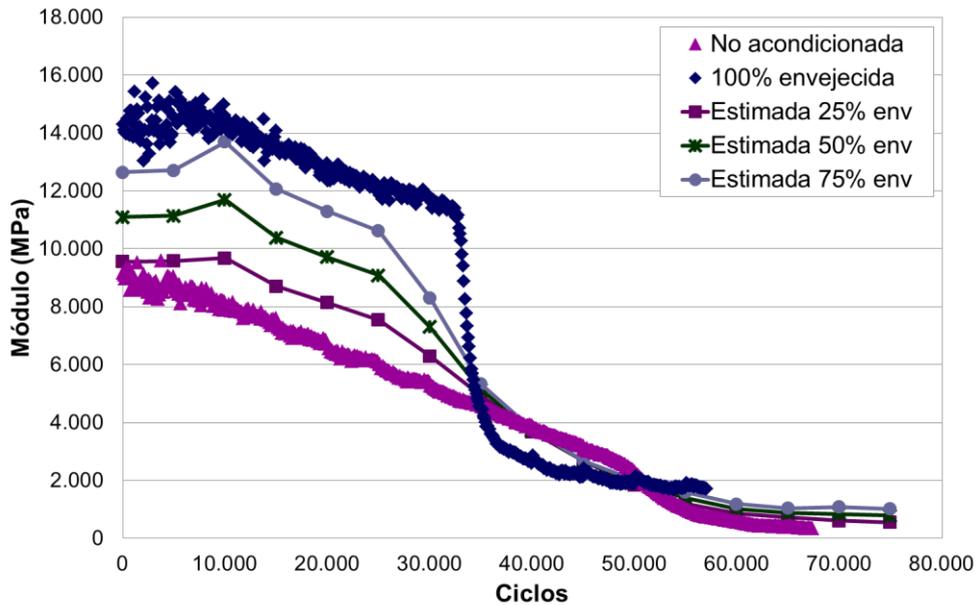


Figura 4.58. Evolución del módulo con el número de ciclos de una probeta representativa de la mezcla fabricada con ligante 50/70 en las condiciones: no acondicionada y 100% envejecida, y evolución estimada del módulo de la misma mezcla para los grados de envejecimiento: 25, 50 y 75%.

Para obtener la vida a fatiga de la mezcla considerando la evolución del módulo, así como la degradación de la mezcla por efecto del envejecimiento, se ha realizado nuevamente el procedimiento de cálculo iterativo anteriormente descrito. Sin embargo, en este caso, hay que considerar que al pasar de iteración, la mezcla se habrá envejecido. En la primera iteración, el módulo de la mezcla será el módulo inicial para la condición no envejecida. Sin embargo, a medida que se itera, el grado de envejecimiento aumentará y el módulo será el correspondiente a cada grado de envejecimiento calculado. En la última iteración, el módulo será el de la mezcla totalmente envejecida. Igualmente, al calcular la vida a fatiga en cada iteración, la ley de fatiga habrá cambiado en función del grado de envejecimiento considerado en la mezcla. Las leyes de fatiga para los distintos grados de envejecimiento considerados se han obtenido de igual forma que los valores del módulo, a partir de las leyes de las mezclas no envejecida y envejecida. Siguiendo con el ejemplo de la mezcla fabricada con betún convencional, ensayada a 20°C, la Figura 4.59 muestra gráficamente las leyes de fatiga obtenidas para esta mezcla en función de su grado de envejecimiento.

Por último, una vez obtenida la vida a fatiga para cada iteración, ésta corresponderá a una parte de la vida de la mezcla, dependiendo del número de iteraciones realizadas para llegar a estabilizar el módulo o para que la sección se haga crítica. De esta forma si, por ejemplo, son necesarias tres iteraciones para estabilizar el módulo, la vida a fatiga de la mezcla será la suma de la tercera parte de la vida obtenida en cada iteración. Sin embargo, antes de realizar este paso hay que distinguir entre dos casos:

- Sección de espesor elevado. En este caso, se ha observado que el módulo tiene un efecto significativo en los resultados, lo cual lleva a obtener valores excesivamente altos al calcular la vida a fatiga de la mezcla cuando se encuentra envejecida. Para estos casos, se ha considerado que la vida a fatiga de esta sección será la más restrictiva, es decir, la obtenida cuando la mezcla se encuentra sin envejecer.
- Sección de espesor bajo. Para estos casos, la sección se hace crítica al iterar, siendo la vida a fatiga de la mezcla nula al finalizar el proceso. La vida a fatiga de la mezcla para esta sección será la suma de la correspondiente a cada iteración realizada.

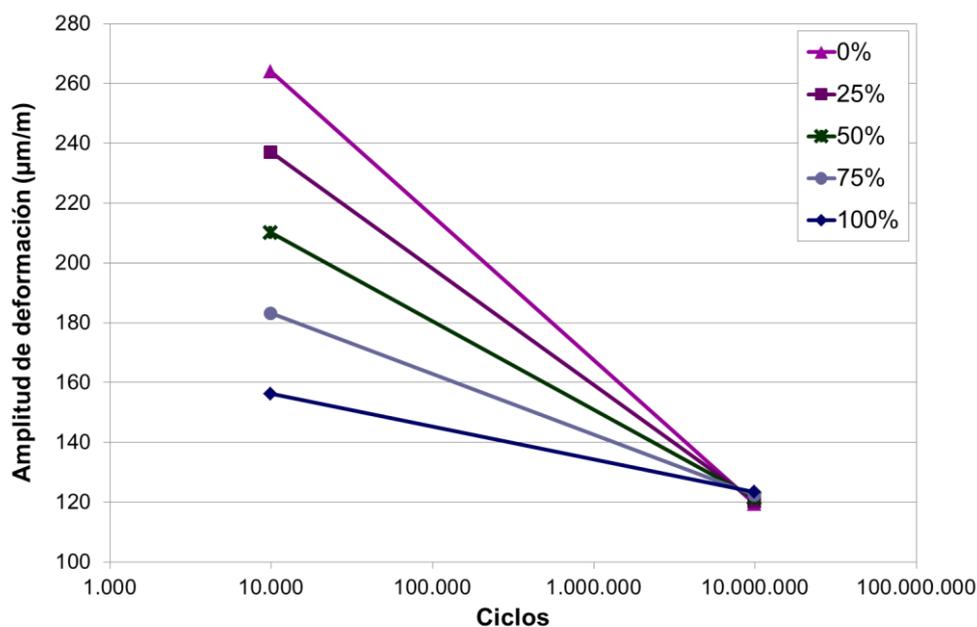


Figura 4.59. Leyes de fatiga para la mezcla fabricada con ligante 50/70, ensayada a 20°C, no acondicionada, envejecida y considerando distintos grados de envejecimiento: 25, 50 y 75%.

La Tabla 4.43 muestra la vida a fatiga de la mezcla considerando la variación del módulo y la degradación de la mezcla al envejecerse, siguiendo los criterios establecidos. Usando esta metodología, los resultados parecen más realistas que los anteriormente obtenidos.

En este apartado, se ha propuesto un método para poder obtener las leyes de fatiga de una mezcla fabricada con distintos tipos de ligante, en diferentes condiciones de envejecimiento y para distintas temperaturas de ensayo. Suponiendo válido el procedimiento de cálculo de la vida a fatiga de las mezclas, a partir de estas leyes de fatiga, y para una determinada sección de firme, es posible obtener su vida a fatiga. Sin embargo, se ha observado que cuando la sección de mezcla bituminosa del firme tiene un espesor elevado, los peores resultados en el cálculo de la vida a fatiga de la mezcla se obtienen para la mezcla sin envejecer a la temperatura de 20°C, obteniendo los mejores resultados para la mezcla envejecida a bajas temperaturas. Estos resultados están indicando que el actual procedimiento de cálculo de la vida del firme da un

peso muy importante a la rigidez de la mezcla cuando se trata de secciones de espesor elevado, obteniendo la mejor vida a fatiga del firme a medida que se rigidiza, sin tener en cuenta que factores como el envejecimiento o la disminución de la temperatura pueden reducir considerablemente la vida a fatiga de la mezcla, como se ha estudiado en apartados anteriores mediante el ensayo EBADE. Con lo cual, el método actual de firmes puede llevar a un infradimensionamiento de la sección de firme si en el cálculo de éste se consideran módulos elevados debidos al envejecimiento o a las bajas temperaturas o, en el otro extremo, se podría llegar a diseñar una sección de firme que llegue a ser crítica en un periodo de tiempo relativamente corto. A esto hay que añadir que, como se ha observado en los resultados de apartados anteriores, el módulo de las mezclas varía con el número de ciclos aplicados, hecho que no es tenido en cuenta en el actual procedimiento de cálculo. Por este motivo, se ha propuesto un método iterativo para el cálculo de la vida a fatiga de la mezcla que permite considerar la evolución del módulo a lo largo su vida. Los resultados obtenidos usando este método permiten discriminar entre secciones de firme críticas o no.

Tabla 4.43. Deformaciones y vida a fatiga obtenidos a partir del proceso iterativo considerando el efecto del envejecimiento durante la vida a fatiga de la mezcla.

Betún	Sección	T ^a (°C)	Módulo inicial (MPa)	I	Módulo final (MPa)	ε (µm/m)		N	
						I _i	I _{final}	Obtenido	Final
50/70	031	20	8.013	2	13.758	57,1	37,2	7,86E+21	2,47E+9
		5	18.983	2	23.772	28,7	24	2,54E+15	3,07E+10
		-5	26.645	2	24.492	21,8	23,2	6,77E+14	3,25E+12
	4131	20	8.013	3	1.360	194	518	48.513	48.513
		5	18.983	2	4.513	113	271	22.719	22.719
		-5	26.645	3	3.062	89,5	336	1.900	1.900
PMB	031	20	6.479	3	9.998	67,4	48	9,18E+12	3,93E+8
		5	15.214	2	20.952	34,4	26,5	4,77E+10	3,38E+10
		-5	17.762	2	23.495	30,3	24,2	2,64E+10	8,72E+9
	4131	20	6.479	4	2.119	220	410	298.399	298.399
		5	15.214	3	2.425	130	381	61.492	61.492
		-5	17.762	2	136	118	2240	15.939	15.939

I: iteraciones.

Por tanto, el objetivo de este análisis ha sido poner de manifiesto la poca idoneidad del procedimiento de cálculo en el diseño de firmes a partir de las leyes de fatiga. Actualmente este cálculo se realiza para mezclas no envejecidas y a la temperatura de 20°C. Pero si se considera que la mezcla está envejecida o a temperaturas más bajas lleva a resultados poco coherentes.

Aunque se ha propuesto un método iterativo para poder tener en cuenta estas condiciones, la poca validez de las hipótesis de cálculo sigue estando presente. Es decir, el método propuesto pretende dar una mejor aproximación a la realidad, pero sigue arrastrando los errores derivados del uso de las leyes de fatiga en mezclas envejecidas y/o a bajas temperaturas.

2.5. Ensayo a flexotracción de dos puntos

Durante el desarrollo de esta tesis doctoral, se ha realizado una estancia en la Universidad de Nottingham con el objetivo de estudiar la fatiga en mezclas asfálticas, así como el efecto que tiene el envejecimiento en la misma, a partir de un ensayo a flexotracción de dos puntos. En este apartado se muestran los resultados, así como las leyes de fatiga obtenidas a partir de este ensayo. El ensayo se ha realizado sobre probetas de mezcla bituminosa no acondicionadas y envejecidas fabricadas con un betún convencional y otro modificado con polímeros donde se ha intentado reproducir el tipo de mezcla utilizada en el estudio de la fatiga realizado en este trabajo (mezcla AC16S).

La Tabla 4.44 muestra la densidad aparente y el contenido de huecos promedio de las probetas trapezoidales, no acondicionadas y envejecidas, fabricadas para ensayarlas a fatiga por flexión en dos puntos.

Tabla 4.44. Densidad aparente y porcentaje de huecos promedio de probetas trapezoidales de mezcla AC16S, no acondicionadas y envejecidas.

Ligante	Acondicionamiento	Densidad aparente (g/cm ³)		Contenido de huecos (%)	
		Promedio	σ	Promedio	σ
50/70	No acondicionadas	2,435	0,012	3,2	0,5
	Envejecidas	2,438	0,012	3,1	0,5
PMB 45/80-65	No acondicionadas	2,448	0,010	2,7	0,4
	Envejecidas	2,434	0,012	3,3	0,5

Las amplitudes de deformación en los distintos ensayos realizados a flexotracción coinciden con algunos de los escalones de deformación del ensayo EBADE. De esta forma, será posible realizar una comparativa de los resultados de este ensayo con los obtenidos en el ensayo EBADE y en el barrido de tiempo a tracción-compresión de forma simple. La Tabla 4.45 muestra los diferentes escalones de deformación del ensayo EBADE considerados en el ensayo a flexotracción de dos puntos.

Tabla 4.45. Escalones de deformación del ensayo EBADE y deformaciones consideradas en los ensayos a flexotracción de dos puntos.

Mezcla no acondicionada				Mezcla envejecida			
50/70		PMB 45/80-65		50/70		PMB 45/80-65	
Escalón	ε ($\mu\text{m/m}$)	Escalón	ε ($\mu\text{m/m}$)	Escalón	ε ($\mu\text{m/m}$)	Escalón	ε ($\mu\text{m/m}$)
5	125	10	250	5	125	9	225
7	175	11	275	7	175	10	250
9	225	14	350	8	200	11	275
11	275	15	375	9	225	12	300
14	350	17	425	11	275	14	350

El módulo inicial del material en este ensayo se define como el registrado en el ciclo 100 del ensayo. En la Tabla 4.46 se presentan los valores de módulo inicial para los distintos niveles de deformación considerados; el módulo tiende a ser menor a medida que aumenta la deformación impuesta. Para analizar con más precisión la dependencia del módulo con la deformación impuesta se ha realizado un análisis de varianza, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 4.47. A partir de los resultados obtenidos no se puede confirmar que el módulo inicial en los ensayos realizados sea dependiente de la deformación aplicada, ya que sólo se cumple en ciertos casos de estudio. Sin embargo, la evolución del módulo si va a depender de la deformación impuesta. Así, la Figura 4.60 muestra la evolución del módulo de una probeta representativa para cada una de las deformaciones consideradas en la mezcla no acondicionada fabricada con betún convencional. Se observa cómo a medida que aumenta la deformación, la degradación de la probeta, la cual viene dada por una disminución del módulo, se produce de forma más rápida. Igualmente, la Figura 4.61 muestra la evolución del módulo para la mezcla envejecida fabricada con betún convencional, y la Figura 4.62 y Figura 4.63 la muestran para la mezcla fabricada con betún modificado, no acondicionada y envejecida, respectivamente.

Tabla 4.46. Valores de módulo inicial para los distintos niveles de deformación considerados.

Mezcla no acondicionada				Mezcla envejecida			
50/70		PMB 45/80-65		50/70		PMB 45/80-65	
ϵ ($\mu\text{m/m}$)	Módulo inicial						
125	6.299	250	5.496	125	11.937	225	9.107
175	6.173	275	5.582	175	11.883	250	9.562
225	6.091	350	4.481	200	11.401	275	8.894
275	5.381	375	5.107	225	9.514	300	8.969
350	5.256	425	4.956	275	10.574	350	8.833

Tabla 4.47. Resultados del análisis de varianza de los resultados de módulo inicial en función de la deformación.

Betún	Acondicionamiento	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F	Probabilidad
50/70	No acond	Intergrupo	1.827.850	4	456.962	67,817	6,27E-4
		Intragrupo	26.953	4	6.738		
		Total	1.854.802	8			
	Envejecidas	Intergrupo	2.388.858	3	796.286	3,731	0,118
		Intragrupo	853.644	4	213.411		
		Total	3.242.502	7			
PMB 45/80-65	No acond	Intergrupo	1.007.687	4	251.922	4,092	0,101
		Intragrupo	246.289	4	61.572		
		Total	1.253.976	8			
	Envejecidas	Intergrupo	1.094.318	4	273.579	6,415	0,033
		Intragrupo	216.251	5	42.650		
		Total	1.307.568	9			

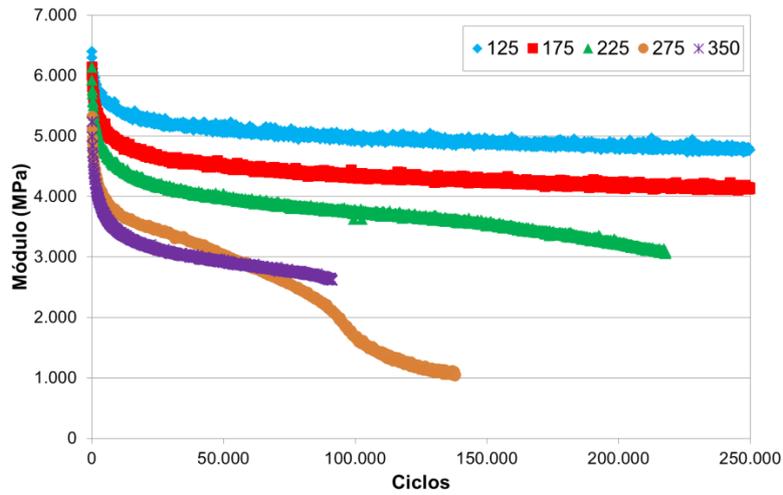


Figura 4.60. Evolución del módulo de una probeta representativa para cada una de las distintas deformaciones impuestas (deformaciones en $\mu\text{m/m}$). Mezcla AC16S, no acondicionada, fabricada con betún 50/70.

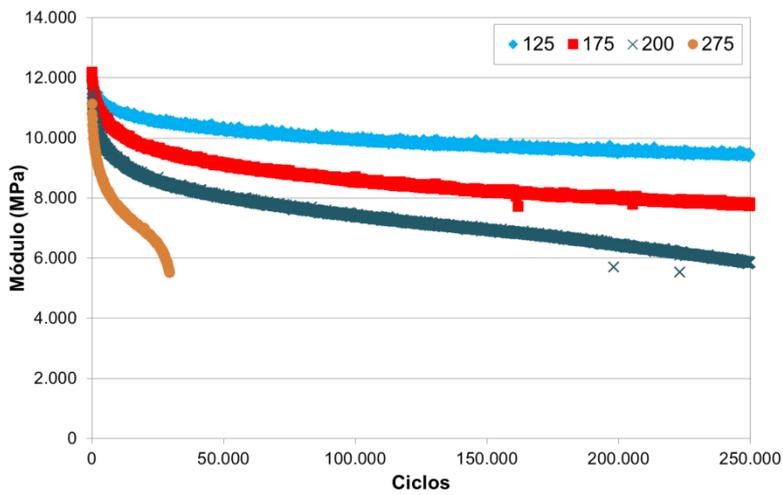


Figura 4.61. Evolución del módulo de una probeta representativa para cada una de las distintas deformaciones impuestas (deformaciones en $\mu\text{m/m}$). Mezcla AC16S, envejecida, fabricada con betún 50/70.

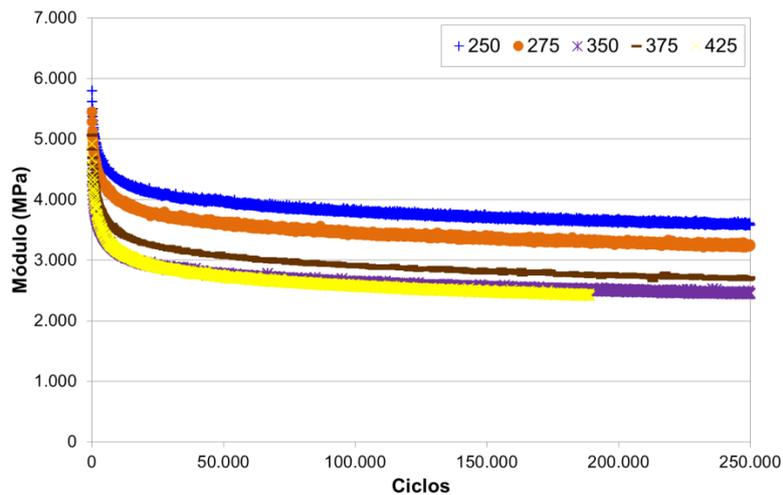


Figura 4.62. Evolución del módulo de una probeta representativa para cada una de las distintas deformaciones impuestas (deformaciones en $\mu\text{m/m}$). Mezcla AC16S, no acondicionada, fabricada con betún PMB 45/80-65.

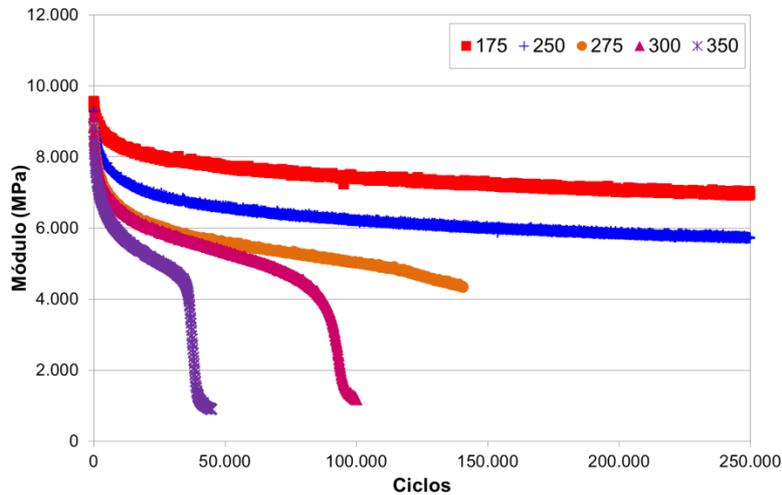


Figura 4.63. Evolución del módulo de una probeta representativa para cada una de las distintas deformaciones impuestas (deformaciones en $\mu\text{m/m}$). Mezcla AC16S, envejecida, fabricada con betún PMB 45/80-65.

Para analizar el comportamiento de la mezcla a fatiga, así como su comportamiento a fatiga cuando la misma se encuentra envejecida, se han obtenido las leyes de fatiga de la mezcla, las cuales muestran la relación existente entre la deformación aplicada y el número de ciclos hasta fallo. El número de ciclos hasta fallo en el ensayo a flexotracción de dos puntos se ha obtenido como aquel en el que el módulo inicial se reduce a la mitad, es decir, se ha seguido el criterio convencional de fallo recogido en la UNE-EN 12697-24 [253]. Las leyes de fatiga obtenidas mediante este criterio de fallo para los cuatro casos de estudio (mezcla fabricada con betún convencional o con betún modificado, sin acondicionar o envejecida) se muestran en la Tabla 4.48. El ajuste de las leyes de fatiga a los resultados obtenidos marcado por el coeficiente de correlación R^2 es bueno ya que en todos los casos este coeficiente se encuentra en torno a 0,9. Para cada ley de fatiga, se ha calculado el parámetro ϵ_6 , anteriormente definido. Este parámetro muestra que la mezcla capaz de soportar mayores deformaciones, y por lo tanto, más resistente a fatiga, es la fabricada con betún modificado no acondicionada, seguida por la mezcla fabricada con el mismo ligante envejecida. Esto implica que este tipo de mezcla, incluso envejecida, posee una capacidad superior para resistir la fatiga comparada con la mezcla fabricada con betún convencional.

Tabla 4.48. Leyes de fatiga del ensayo a flexotracción de dos puntos.

Betún	Acondicionamiento	Ley de fatiga	R^2	$\epsilon_6(\mu\text{m/m})$
50/70	No acondicionada	$\epsilon = 3100,8 N^{-0,204}$	0,912	185
	Envejecida	$\epsilon = 1239,8 N^{-0,149}$	0,959	158
PMB 45/80-65	No acondicionada	$\epsilon = 7509,8 N^{-0,235}$	0,864	292
	Envejecida	$\epsilon = 1822,2 N^{-0,157}$	0,897	208

En la Figura 4.64 se representan las leyes de fatiga para los cuatro casos de estudio. Si se compara el comportamiento de la mezcla envejecida y sin envejecer, se observa que para

deformaciones bajas, independientemente del ligante, ambas leyes de fatiga (mezcla no acondicionada y mezcla envejecida) tienden a unirse.

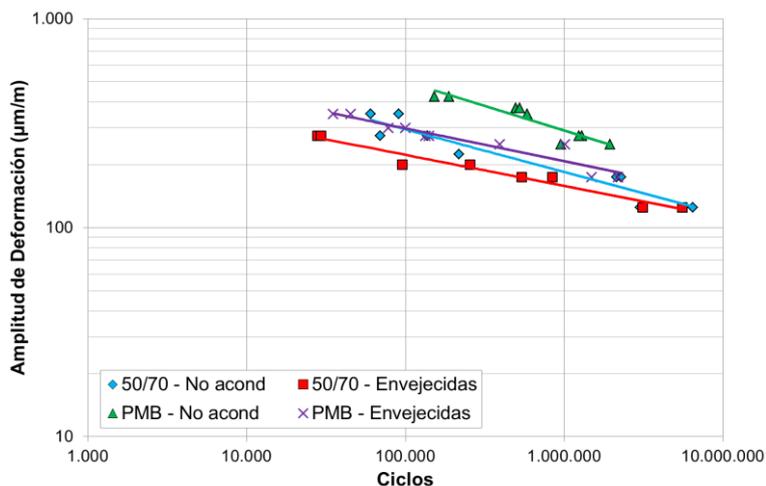


Figura 4.64. Leyes de fatiga en el ensayo a flexotracción de dos puntos (2PB).

Como ya se ha comentado, estas leyes de fatiga se han obtenido usando el criterio convencional de fallo correspondiente al número de ciclos para los cuales el módulo inicial se reduce a la mitad. Sin embargo, tal y como diversos autores citan en la literatura [13, 303, 316], este modelo fenomenológico tiene ciertas limitaciones. Si se comparan las leyes de fatiga obtenidas mediante el criterio convencional de fallo en el ensayo de barrido de tiempo a tracción-compresión con la geometría de probeta usada en el ensayo EBADE, con las leyes obtenidas mediante el ensayo a flexotracción de dos puntos para la mezcla no acondicionada fabricada con los dos tipos de ligantes estudiados, se obtienen las leyes que se muestran en la Figura 4.65. Es evidente que con este criterio de fallo, las leyes de fatiga para un mismo material son bastante diferentes entre sí.

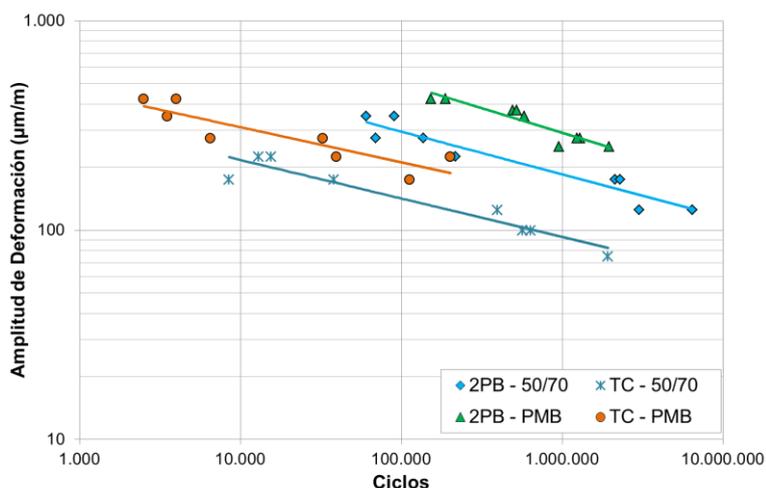


Figura 4.65. Leyes de fatiga obtenidas mediante el criterio convencional de fallo. Ensayos de tracción-compresión (TC) y a flexotracción de dos puntos (2PB). Mezcla no acondicionada fabricada con los betunes 50/70 y PMB 45/80-

A la vista de la comparativa entre las leyes de fatiga del mismo material para los dos ensayos de fatiga considerados (tracción-compresión y flexotracción de dos puntos), se va a proceder a obtener las leyes de fatiga mediante otros criterios de fallo. Los criterios de fallo que se van a usar para la obtención de las leyes de fatiga de la mezcla son los mismos que se han estudiado en el Apartado 2.2: el criterio de fallo del 50% del módulo inicial, el criterio de fallo del ratio de cambio de energía disipada (RDEC), el criterio de fallo del 50% de la DED máxima y el criterio de fallo de la 3ª Fase del módulo. En la Figura 4.66 se muestran las leyes de fatiga de la mezcla fabricada con betún 50/70, obtenidas para los dos ensayos, según los distintos criterios de fallo considerados. Se observa que las leyes de fatiga obtenidas según los diferentes criterios de fallo en el ensayo a flexotracción prácticamente coinciden para todos los casos; la más alejada del grupo corresponde a la del criterio convencional de fallo. Además en la figura se observa que, para los criterios de fallo del RDEC y de la 3ª Fase del módulo, las leyes para ambos ensayos tienden a acercarse. Aun así, las leyes de fatiga son diferentes para los mismos materiales en función del tipo de ensayo. Los ensayos de fatiga a flexotracción de dos puntos se han realizado en otro centro distinto con áridos y betunes de distinta procedencia al que se han realizado los de tracción-compresión, es por ello, que las diferencias encontradas entre las leyes de fatiga puedan ser debidos a que la mezcla no tiene las mismas características que la usada en los ensayos de tracción-compresión.

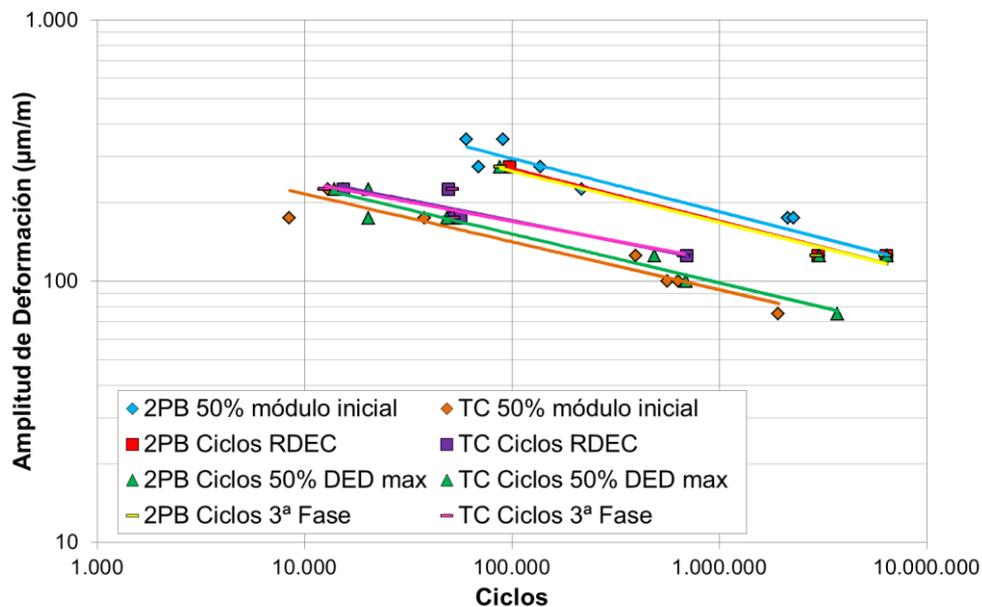


Figura 4.66. Leyes de fatiga a partir de los ensayos de tracción-compresión (TC) y flexotracción de dos puntos (2PB) según los criterios de fallo del 50% del módulo inicial, del ratio de cambio de la energía disipada (RDEC), del 50% de la DED máxima y de la 3ª fase del módulo. Mezcla fabricada con betún 50/70.

Hasta ahora, se ha obtenido una relación entre las leyes de fatiga de los dos ensayos según el criterio convencional de fallo. Siguiendo la metodología del RDEC es posible determinar un

parámetro denominado *Plateau Value* (PV). Los valores del RDEC siguen una distribución como la mostrada en la Figura 4.67. Durante la segunda fase, el valor del RDEC es casi constante, caracterizado por un porcentaje constante de energía que se transforma en daño. El *Plateau Value* se encuentra en esta fase y se define como el valor de RDEC correspondiente al número de ciclos de carga donde el módulo inicial se reduce a la mitad, Nf_{50} . El valor del PV puede ser calculado usando la ecuación 4.3.

$$PV = \frac{1 - (1 + \frac{100}{Nf_{50}})^k}{100} \quad (4.3)$$

donde k es la pendiente de la curva exponencial calculada a partir de la regresión de los valores de energía disipada frente al número de ciclos de carga (Figura 4.68).

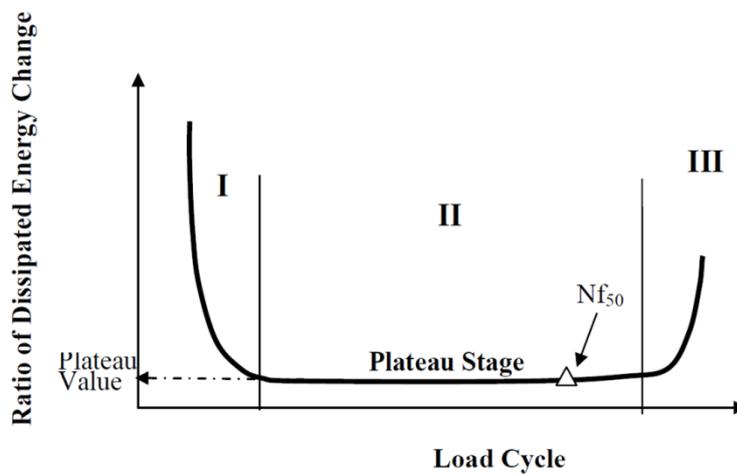


Figura 4.67. Representación típica de las tres regiones del RDEC [313].

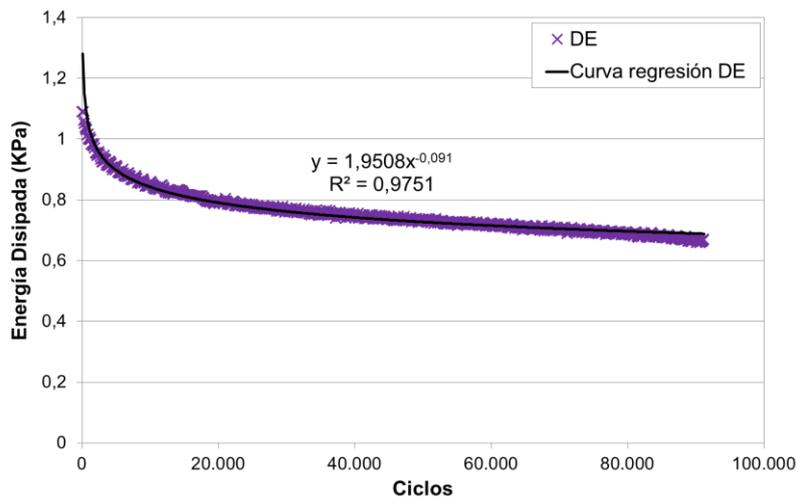


Figura 4.68. Evolución de la energía disipada y curva de regresión. Ensayo a flexotración de dos puntos. Deformación de 350 $\mu\text{m}/\text{m}$. Mezcla AC16S con betún 50/70.

El valor del PV proporciona una relación única con las leyes de fatiga para diferentes tipos de mezclas, modos de carga y niveles de carga. La Figura 4.69 muestra la relación PV- Nf_{50} de

las mezclas estudiadas. Se observa que los resultados se relacionan siguiendo una función potencial independientemente del tipo de mezcla o ensayo realizado.

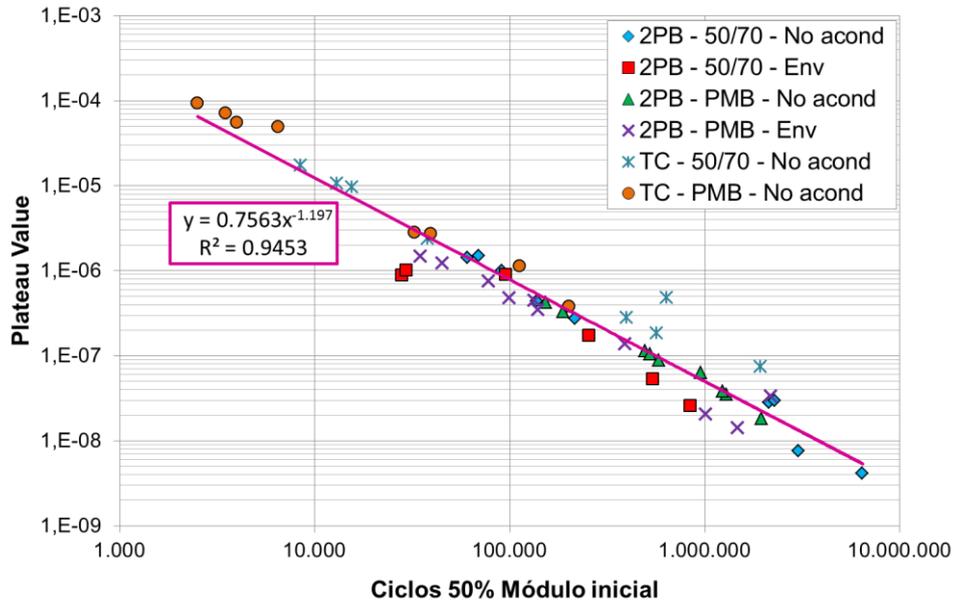


Figura 4.69. Relación entre el *plateau value* y el número de ciclos al 50% del módulo inicial. Mezclas no acondicionadas (No acond) y envejecidas (Env). Ensayo de tracción-compresión (TC) y a flexotensión de dos puntos (2PB). Mezcla AC16S fabricada con los betunes 50/70 y PMB 45/80-65.

Shen y Carpenter [274] encontraron una relación única entre el *plateau value* y la resistencia a fatiga para diferentes tipos de mezclas, modos de carga, niveles de carga y condiciones de ensayo (frecuencia, periodos de reposo y temperatura), expresada por la ecuación 4.4.

$$PV = 0,4428 Nf_{50}^{-1,1102} \tag{4.4}$$

Esta relación prácticamente coincide con la obtenida anteriormente a partir de los ensayos realizados en este trabajo. Sabiendo que existe una relación única entre el PV y el Nf_{50} , sería posible determinar las leyes de fatiga a partir del valor del PV.

3. Efecto de los periodos de reposo en la fatiga de las mezclas asfálticas

Las mezclas bituminosas que se encuentran en el pavimento están sometidas a un proceso de carga que no es continuo, habiendo un intervalo de tiempo relativamente grande entre el paso de un vehículo pesado y el siguiente. A esto hay que añadir el hecho de que los camiones no siguen la misma trazada, y por lo tanto, para que un camión pase dos veces por el mismo punto puede pasar aún un mayor periodo de tiempo. El efecto que este proceso puede tener en la respuesta a

fatiga de las mezclas asfálticas se ha analizado mediante la aplicación de dos configuraciones de ensayo diferentes:

- En primer lugar, se ha realizado un ensayo de barrido de deformaciones, aplicando sucesivos escalones de carga en los que la amplitud de deformación va aumentando progresivamente (ensayo EBADE), pero entre los cuales, al finalizar cada escalón de carga, la deformación se reduce a su valor inicial, correspondiente al del primer escalón (25 $\mu\text{m/m}$). Con esto se pretende valorar la capacidad del material para recuperar sus propiedades al disminuir la sollicitación.
- En segundo lugar, se ha evaluado el efecto de introducir periodos de reposo en un ensayo de barrido de tiempo, esto es, se aplican sucesivas series de ciclos de carga con una misma amplitud de deformación, dejando pasar un periodo de tiempo entre cada serie de carga. Este estudio se ha realizado sobre una mezcla discontinua tipo BBTM con un tamaño máximo de árido de 8 mm fabricada con los ligantes 15/25, 50/70 y PMB 45/80-65.

Hay que tener en cuenta que el efecto que pueda tener la introducción de periodos de reposo en la respuesta a fatiga de las mezclas se ve condicionado por diversos factores como son la temperatura o el envejecimiento. Por este motivo, estos ensayos se han realizado a distintas temperaturas y tanto sobre mezclas envejecidas, como sin envejecer.

La Tabla 4.49 muestra los valores promedio de densidad aparente y contenido de huecos de las probetas de mezcla BBTM fabricadas con el betún de penetración 50/70, con el betún de penetración 15/25 y con el betún modificado PMB 45/80-65.

Tabla 4.49. Porcentaje de huecos promedio de probetas de mezcla BBTM.

Ligante	Acondicionamiento	Densidad aparente (g/cm^3)		Contenido de huecos (%)	
		Promedio	σ	Promedio	σ
50/70	No acondicionadas	2,443	0,006	2,6	0,2
	Envejecidas	2,422	0,004	3,5	0,2
15/25	No acondicionadas	2,443	0,003	2,6	0,1
PMB 45/80-65	No acondicionadas	2,436	0,008	2,9	0,3

3.1. Ensayos de Barrido de Deformaciones

La Figura 4.70 muestra la evolución del módulo obtenida para una probeta representativa de la mezcla fabricada con los ligantes 50/70 y PMB 45/80-65, así como la deformación impuesta en el ensayo EBADE con y sin retorno a la deformación inicial al final de cada escalón de carga, a una temperatura de 20°C. Se observa que al disminuir la deformación al valor inicial, los valores de módulo se recuperan. Sin embargo, no llegan a recuperar el valor del módulo inicial, ni siquiera para los niveles de deformación más bajos. Esto puede deberse a la corta

duración de los escalones de deformación del ensayo (5.000 ciclos), la cual no permite que el material se recupere en su totalidad después de haber sido sometido a una deformación más alta, o también a que se hayan producido cambios irreversibles en la mezcla durante los escalones de deformación más altos. Sin embargo, la tendencia observada en la evolución del módulo es una caída importante de este valor cuando la amplitud de deformación aumenta, seguida por un aumento notable cuando la amplitud de deformación disminuye.

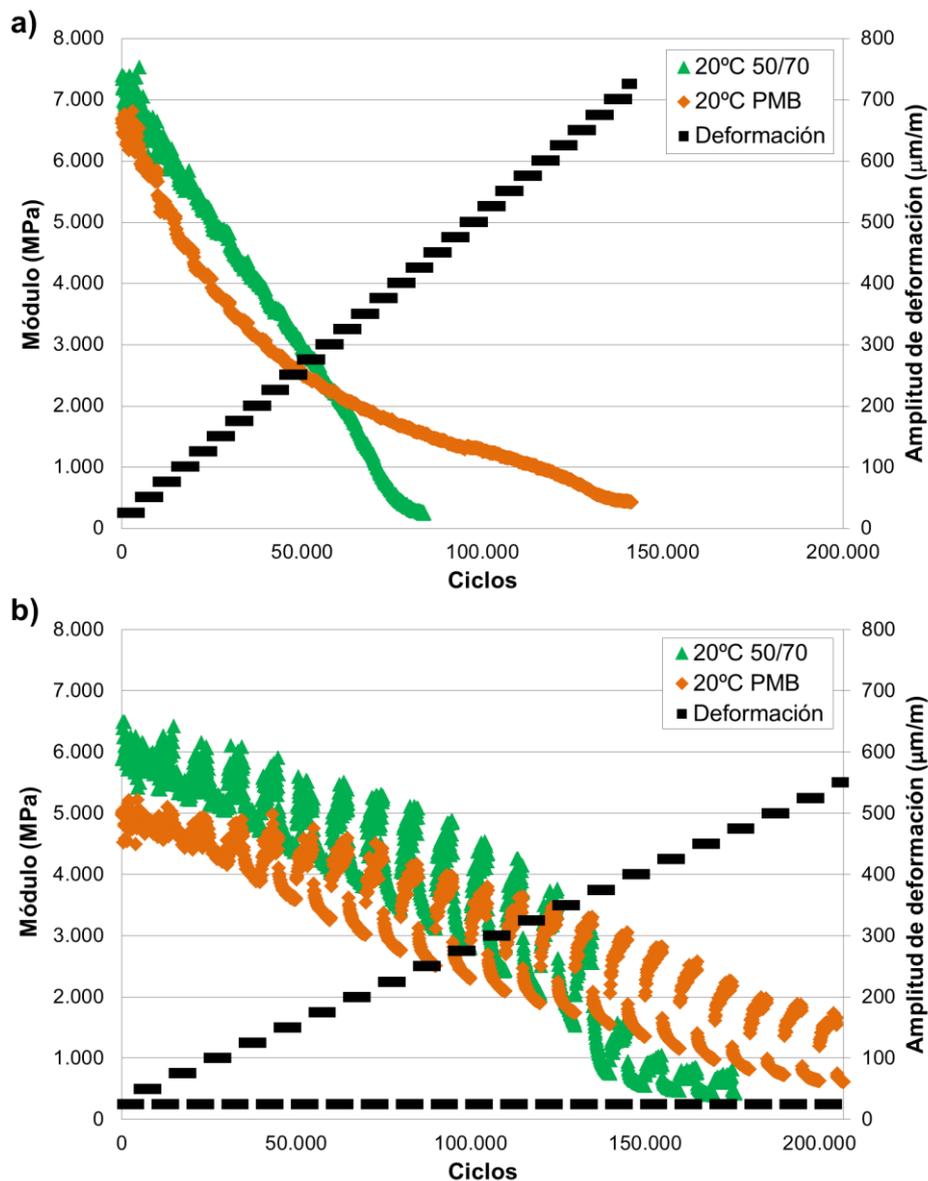


Figura 4.70. Evolución del módulo con el número de ciclos en el ensayo EBADE a 20°C: a) sin periodos de reposo (la deformación aumenta progresivamente) y b) con retorno a la deformación inicial al final de cada escalón de carga. Mezcla BBTM 11A fabricada con los ligantes 50/70 y PMB 45/80-65.

Al usar un ligante de menor penetración la tendencia del módulo varía. La Figura 4.71 muestra la evolución del módulo de la mezcla fabricada con betún 15/25, así como la deformación impuesta durante el ensayo EBADE con retorno a la deformación inicial al final de

cada escalón de carga. En este caso, el módulo se mantiene más o menos constante a lo largo del ensayo hasta que se produce el fallo de la probeta, momento en el cual el módulo disminuye bruscamente. Este comportamiento, típico de una mezcla rígida, es completamente diferente al anterior, ya que el módulo no disminuye al aplicarle una sollicitación, ni se recupera parcialmente al disminuir la sollicitación aplicada. Este efecto es también observado cuando la mezcla con ligantes de mayor penetración se ensayan a temperaturas bajas (Figura 4.72).

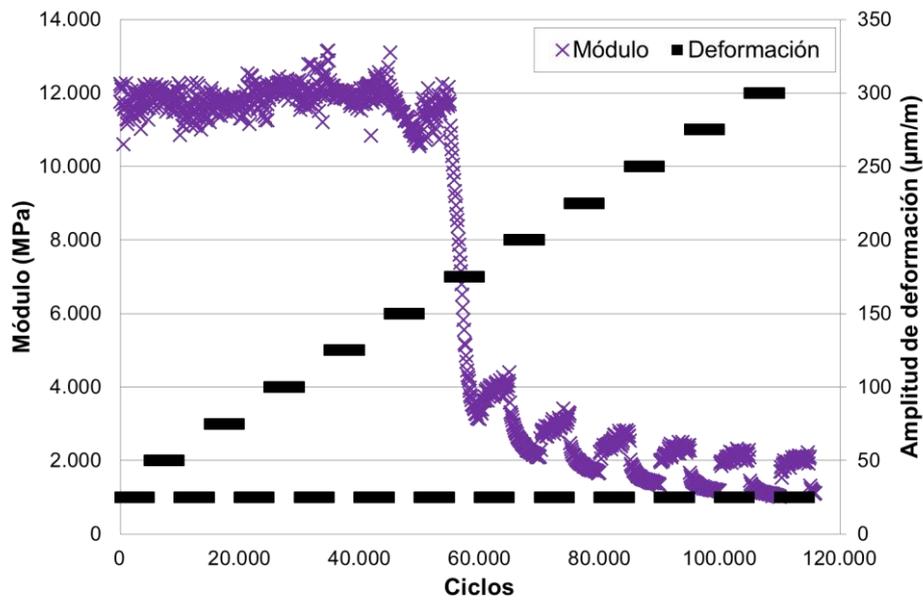


Figura 4.71. Evolución del módulo con el número de ciclos en el ensayo EBADE a 20°C con retorno a la deformación inicial al final de cada escalón de deformación. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 15/25.

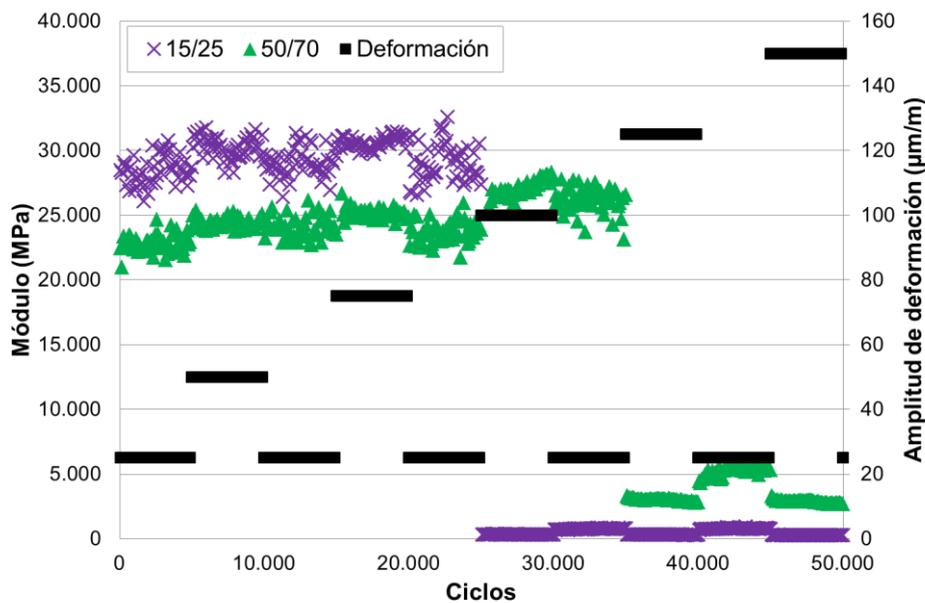


Figura 4.72. Evolución del módulo con el número de ciclos en el ensayo EBADE a -5°C con retorno a la deformación inicial al final de cada escalón de deformación. Mezcla BBTM 11A fabricada con los betunes 15/25 y 50/70.

Cuando la mezcla fabricada con el ligante 50/70 es envejecida y ensayada a una temperatura de 20°C, Figura 4.73, se obtienen resultados de módulo inicial próximos a los obtenidos para la mezcla fabricada con el ligante 15/25. Sin embargo, en este caso la mezcla soporta un mayor número de ciclos hasta el fallo y su módulo no cae de forma tan brusca. Durante los primeros escalones de deformación se observa que el módulo se mantiene constante, la mezcla no disminuye su rigidez durante los escalones a deformaciones más altas, ni recupera parte del módulo durante los escalones a deformación baja. Sin embargo, a partir del cuarto escalón de carga, se produce una pérdida de módulo durante la aplicación de la deformación correspondiente a ese escalón de carga. Igualmente, durante la aplicación de la deformación más baja, el módulo recupera gran parte de su valor. Este comportamiento es muy similar al observado en la mezcla no envejecida fabricada con el ligante 50/70 y ensayada a 20°C, aunque en este caso, al encontrarse la mezcla envejecida, el módulo cae de forma más rápida.

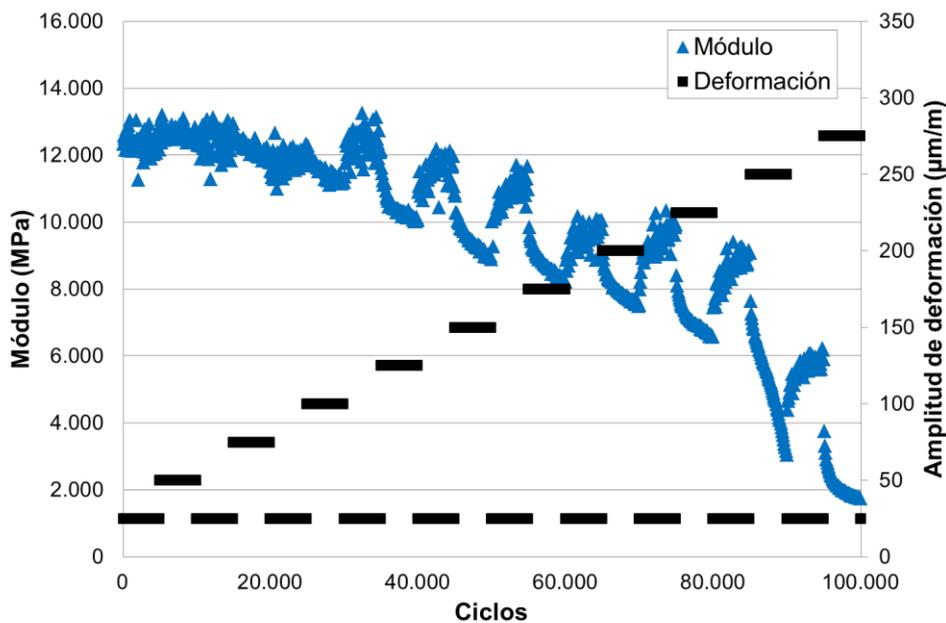


Figura 4.73. Evolución del módulo con el número de ciclos en el ensayo EBADE a 20°C con retorno a la deformación inicial al final de cada escalón de deformación. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70, envejecida.

Al reducir la temperatura de ensayo de la mezcla envejecida hasta 5°C, la mezcla se vuelve más rígida modificando su respuesta frente a estas secuencias de subidas y bajadas de la amplitud de deformación aplicada, Figura 4.74. En este caso, la mezcla mantiene su módulo inicial prácticamente constante hasta que se produce la rotura frágil del material. Al igual que ocurría con la mezcla no envejecida fabricada con el betún de penetración más duro, así como con las mezclas no envejecidas ensayadas a temperaturas más bajas, la mezcla ha perdido sus propiedades viscoelásticas, de tal forma que se comporta como un material puramente elástico.

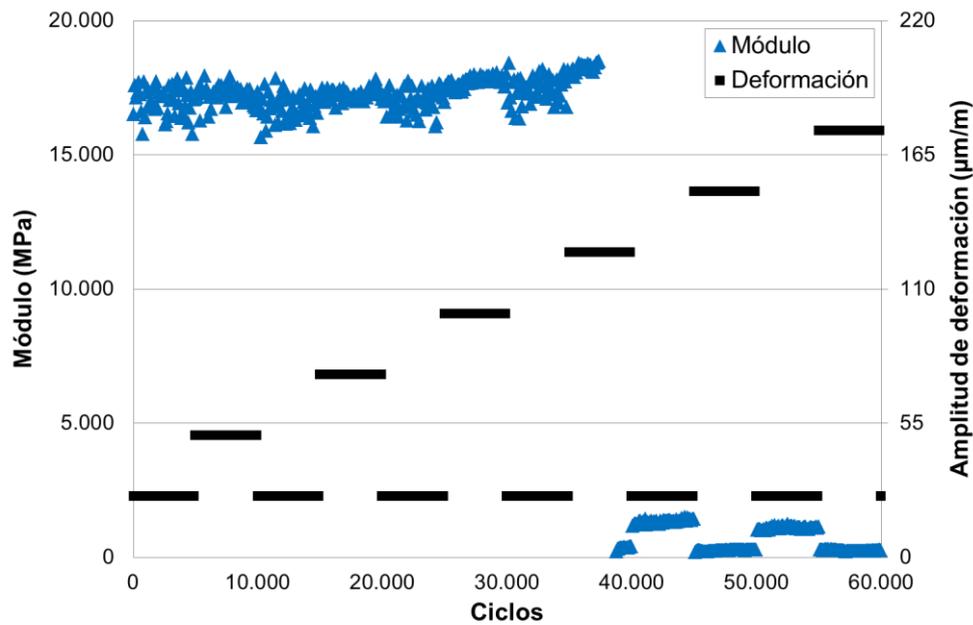


Figura 4.74. Evolución del módulo con el número de ciclos en el ensayo EBADE a 5°C con retorno a la deformación inicial al final de cada escalón de deformación. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70, envejecida.

3.2. Ensayos de Barrido de Tiempo

El efecto que la introducción de periodos de reposo en un ensayo de barrido de tiempo puede tener en la respuesta a fatiga de la mezcla asfáltica si se somete a diferentes ciclos de carga, de determinada duración, a una amplitud de deformación constante, dejando pasar un determinado periodo de tiempo entre ellos, ha sido estudiado considerando distinta duración de los ciclos de carga, diferente duración de los periodos de reposo, distintas amplitudes de deformación y distintas temperaturas de ensayo. A modo de resumen, la Tabla 4.50 recoge los distintos casos estudiados junto con las principales variables consideradas.

Tabla 4.50. Casos estudiados en el análisis del efecto de la introducción de periodos de reposo en un ensayo de barrido de tiempo

	Ciclos de carga	Periodo de reposo (min)	Amplitud de deformación (µm/m)	Temperatura de ensayo (°C)	Ligante
Caso 1	200	10	200	20	50/70
Caso 2	200	10	100	5	50/70
Caso 3	200	10	125 y 150	5	50/70
Caso 4	200	5	225	20	50/70
Caso 5	200	5	100	20	15/25
Caso 6	200	5	125	20	50/70*
Caso 7	50.000	60	100	20	15/25

*mezcla envejecida.

La amplitud de deformación para cada mezcla se ha escogido en función de los resultados de los valores de DED en los ensayos de barrido de deformaciones (EBADE) con retorno a la deformación inicial al final de cada escalón de carga, realizadas sobre la misma mezcla. De esta forma, se han buscado valores de deformación que sean, por una parte, suficientemente altos para que al aplicar esta deformación se produzca una variación en la disipación de energía durante el proceso de carga, y por otra parte, no excesivamente altos para que la rotura de la mezcla no se produzca de forma inmediata. Por ejemplo, la Figura 4.75 muestra la evolución de la DED en el ensayo de barrido de deformaciones con retorno a la deformación inicial al final de cada escalón de deformación, para la mezcla fabricada con betún 50/70 ensayada a 20°C. A partir de estos resultados, se ha escogido una deformación de 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ para realizar el ensayo de barrido de tiempo, ya que para esta deformación se observa una disminución de la DED con la aplicación de la sollicitación, pero sin que se produzca la rotura brusca de la mezcla al aplicarla. Así, la mezcla sometida a un barrido de tiempo con esta amplitud de deformación romperá debido a la pérdida progresiva de sus propiedades.

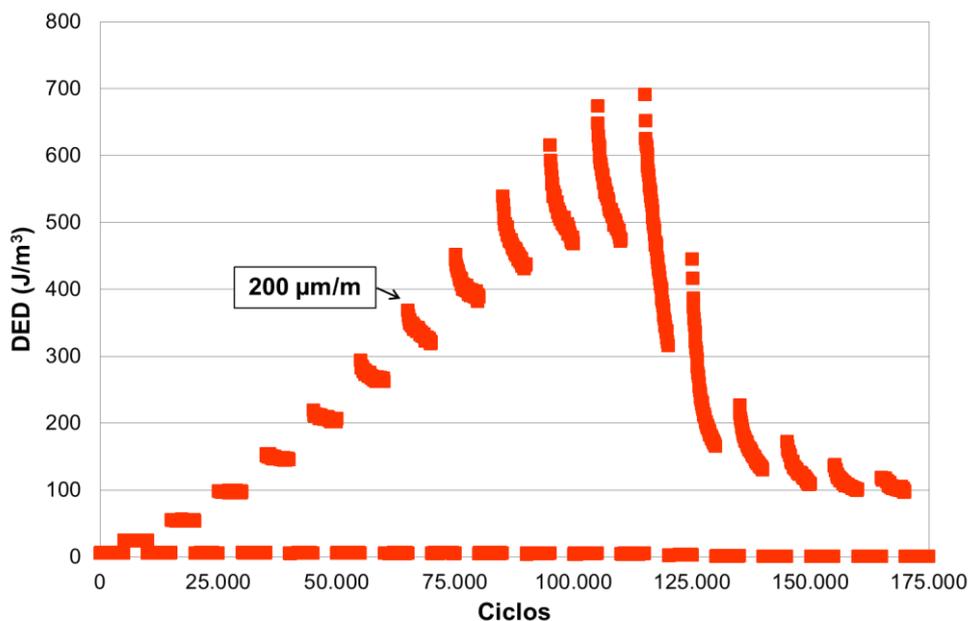


Figura 4.75. Evolución de la DED en el ensayo EBADE a 20°C con retorno a la deformación inicial al final de cada escalón de deformación. Probeta representativa de la mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70.

En primer lugar, se ha analizado el efecto de los periodos de reposo sometiendo la mezcla a una aplicación de 200 ciclos de carga y dejando pasar un periodo de tiempo de 10 minutos entre cada 200 ciclos de carga (Figura 4.76).

La Figura 4.77 muestra la evolución del módulo complejo de una probeta representativa al introducir periodos de reposo en el ensayo de barrido de tiempo con una deformación de 200

$\mu\text{m}/\text{m}$, a una temperatura de 20°C y a una frecuencia de 10 Hz (Caso 1). Como se puede observar, el efecto ha sido muy importante si se compara con el proceso de deterioro en el cual se mantiene la sollicitación de forma continuada (ensayo de barrido de tiempo). En el caso del ensayo clásico de barrido de tiempo, con la misma amplitud de deformación, se observa cómo se produce una caída importante del módulo, correspondiente a la fase I, para después continuar el deterioro de forma continuada e importante, fase II, hasta que en pocos ciclos se produce el fallo total de la mezcla. Al introducir periodos de reposo, se observa que el módulo decrece muy rápidamente al aplicar la sollicitación durante los primeros 200 ciclos. Sin embargo, al parar la sollicitación durante el periodo de reposo el módulo se recupera, para nuevamente volver a bajar en los siguientes 200 ciclos de sollicitación. Al final de los 200 ciclos el estado de deterioro de la mezcla es similar al producido en los 200 primeros ciclos del barrido de tiempo sin periodos de reposo, sin que apenas se incremente el deterioro por fatiga. Es decir, a diferencia del ensayo de barrido de tiempo sin periodos de reposo, al ir aplicando estas secuencias de paradas y ciclos de carga se observa que, durante los periodos de reposo el deterioro producido en la serie de carga anterior se recupera, y el daño producido en la siguiente serie de carga es prácticamente el recuperado. Esto está indicando que es posible aplicar un mayor número de cargas sin llegar a producir el fallo de la mezcla.

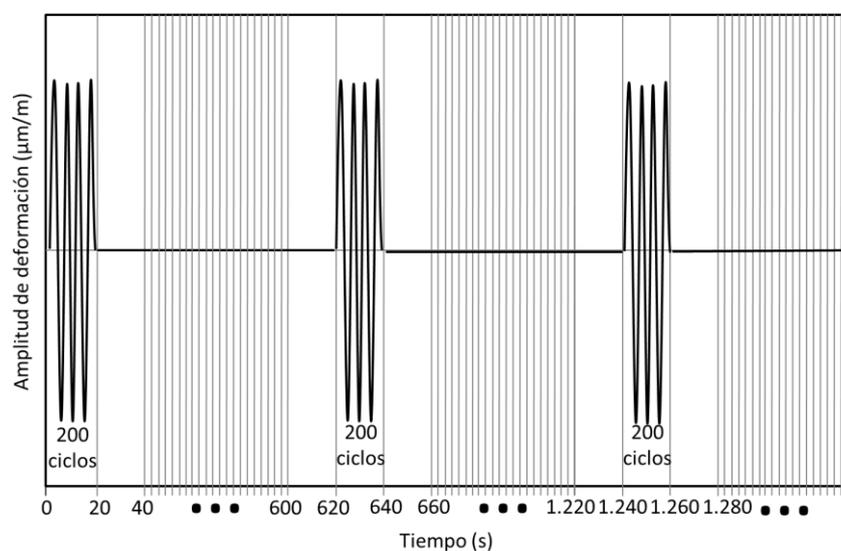


Figura 4.76. Esquema representativo del ensayo de barrido de tiempo introduciendo periodos de reposo de 10 min cada 200 ciclos de carga.

Estos resultados ponen de manifiesto la importancia de considerar la secuencia de la aplicación de sollicitaciones en los ensayos de fatiga, ya que no es lo mismo aplicarlos de forma rápida y continuada (como es el caso de los ensayos de fatiga actuales) que aplicarlos de forma más lenta (como ocurre en el firme de una carretera).

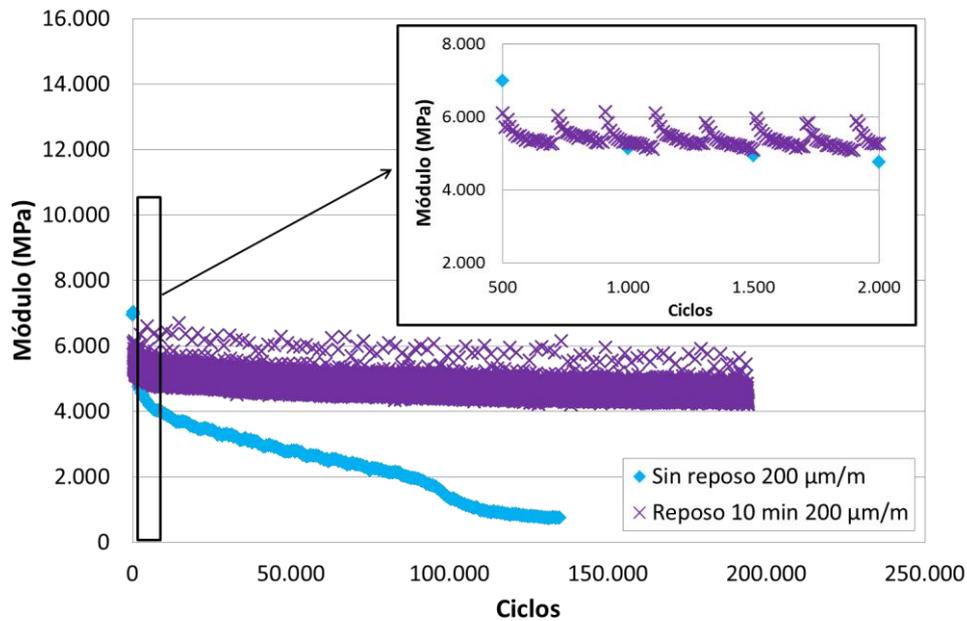


Figura 4.77. Evolución del módulo en un ensayo de barrido de tiempo, frente al obtenido introduciendo periodos de reposo de 10 minutos cada 200 ciclos de carga. Caso 1: ensayos a $200\ \mu\text{m/m}$, 20°C y $10\ \text{Hz}$. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70.

A una temperatura de ensayo baja, 5°C , el efecto de los periodos de reposo varía considerablemente para la misma mezcla (BBTM 11A fabricada con betún 50/70). La Figura 4.78 muestra la evolución del módulo en el ensayo de barrido de tiempo con una deformación de $100\ \mu\text{m/m}$, a una temperatura de 5°C y a una frecuencia de $10\ \text{Hz}$, así como los resultados del ensayo de barrido de tiempo con periodos de reposo de 10 minutos cada 200 ciclos a la misma deformación y condiciones de ensayo (Caso 2). En este caso, no se observan deterioros importantes durante el proceso de carga, ni recuperaciones en los periodos de reposo, comportándose el material como un sólido elástico. Igual que ocurría anteriormente para una temperatura de 20°C , la mezcla es capaz de soportar un mayor número de aplicaciones de carga si se introducen periodos de reposo durante el proceso.

Sin embargo, al aumentar la deformación a esa misma temperatura (Caso 3), el comportamiento de la mezcla al aplicar periodos de reposo varía. En la Figura 4.79 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de barrido de tiempo sin periodos de reposo a una deformación de $150\ \mu\text{m/m}$ y los obtenidos en el ensayo de barrido de tiempo con una pausa de 10 minutos cada 200 ciclos, a las deformaciones de $125\ \mu\text{m/m}$ y $150\ \mu\text{m/m}$, todos a una temperatura de 5°C . Se observa que el fallo de la mezcla ensayada con pausas de 10 minutos se produce para una serie de ciclos menor que cuando se realiza un ensayo normal de barrido de tiempo. Igualmente, se observa que, en este caso, la rotura no sólo se produce rápidamente, sino que también se produce de forma más frágil, en comparación con el ensayo de barrido de tiempo sin la introducción de periodos de reposo. Estos resultados ponen de manifiesto el efecto

negativo de un proceso de carga no continuo sobre un pavimento rigidizado por efecto de la temperatura, llegando a producirse su rotura para un periodo de tiempo inferior al calculado mediante los procedimientos clásicos para caracterizar el comportamiento a fatiga de las mezclas, los cuales normalmente se realizan a temperaturas medias.

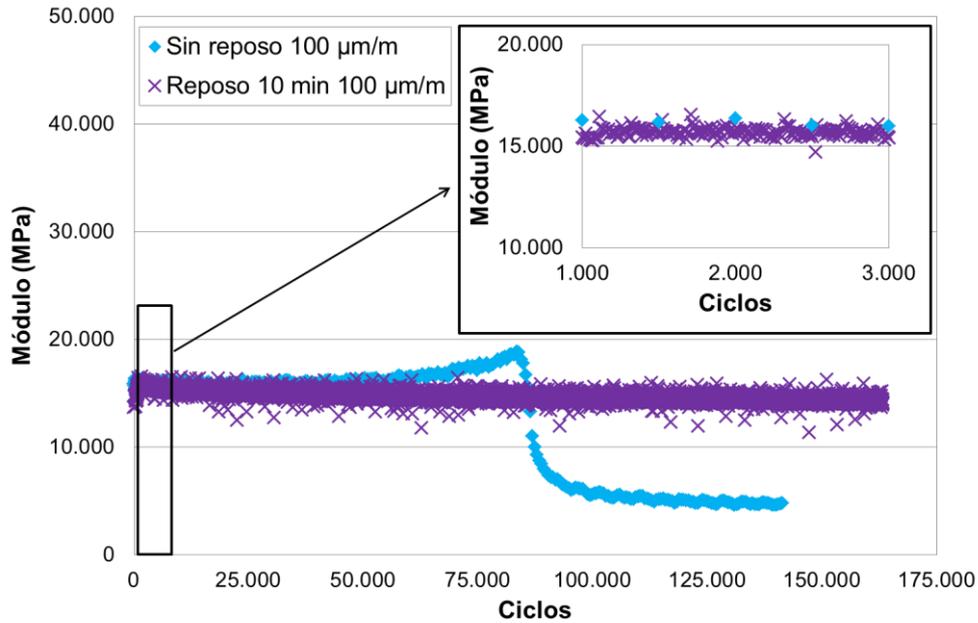


Figura 4.78. Evolución del módulo en un ensayo de barrido de tiempo frente al obtenido introduciendo periodos de reposo de 10 minutos cada 200 ciclos de carga. Caso 2: ensayos a 100 $\mu\text{m}/\text{m}$, 5°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70.

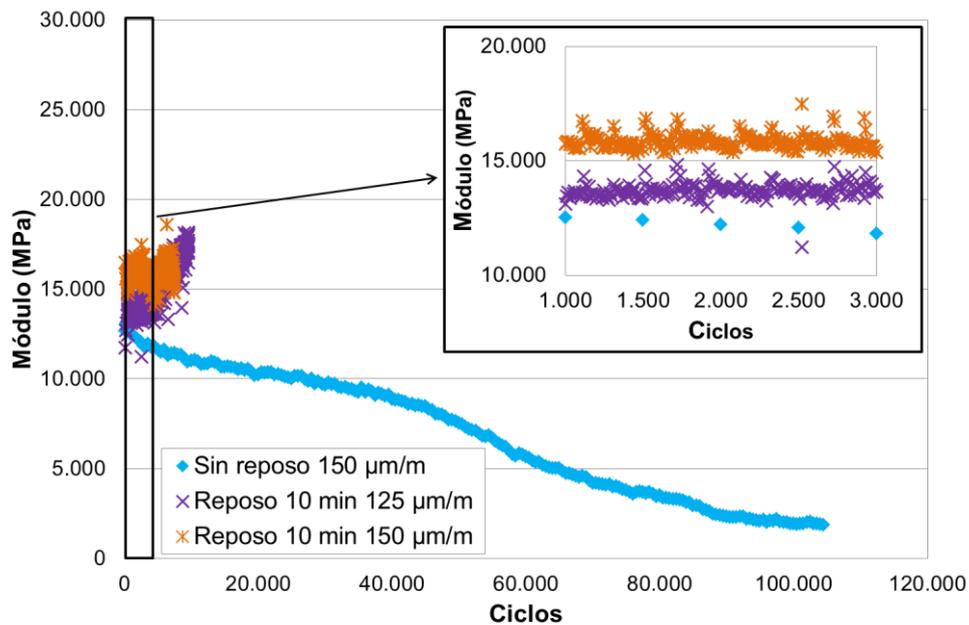


Figura 4.79. Evolución del módulo en un ensayo de barrido de tiempo frente al obtenido introduciendo periodos de reposo de 10 minutos cada 200 ciclos de carga. Caso 3: ensayos a 125 y 150 $\mu\text{m}/\text{m}$, 5°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70.

Este cambio en el comportamiento de la mezcla se encuentra relacionado con la tensión máxima que la misma es capaz de soportar antes de romper. En la Figura 4.80 se muestra la evolución de la tensión en el ensayo EBADE para tres probetas de la mezcla fabricada con betún 50/70 ensayadas a 5°C, donde se observa que la tensión máxima de la mezcla está comprendida entre 1,85 y 2,20 MPa, aproximadamente. Si se analizan los valores de la tensión en el ensayo de barrido de tiempo a una deformación de 100 $\mu\text{m/m}$ a la misma temperatura (Figura 4.81), para las dos configuraciones de ensayo estudiadas (con y sin periodos de reposo de 10 minutos, caso 2) se observa que, en el caso del barrido de tiempo sin periodos de reposo, a medida que la mezcla se ensaya, la tensión aumenta hasta los valores anteriores (en este caso 2 MPa aproximadamente), momento en el cual la mezcla rompe; pero cuando se introducen periodos de reposo, la tensión no llega a alcanzar en ningún momento estos valores. En función de la evolución del módulo, se observa que con periodos de reposo la mezcla rompe para un número de ciclos muy superior al de la mezcla ensayada mediante un barrido de tiempo sin introducir periodos de reposo. Al aumentar la amplitud de deformación a 125 y 150 $\mu\text{m/m}$ (caso 3) se observa que la mezcla ensayada mediante barrido de tiempo introduciendo periodos de reposo rompe cuando se supera una tensión de 2,25 y 2,50 MPa, respectivamente, y lo hace de forma frágil (Figura 4.82).

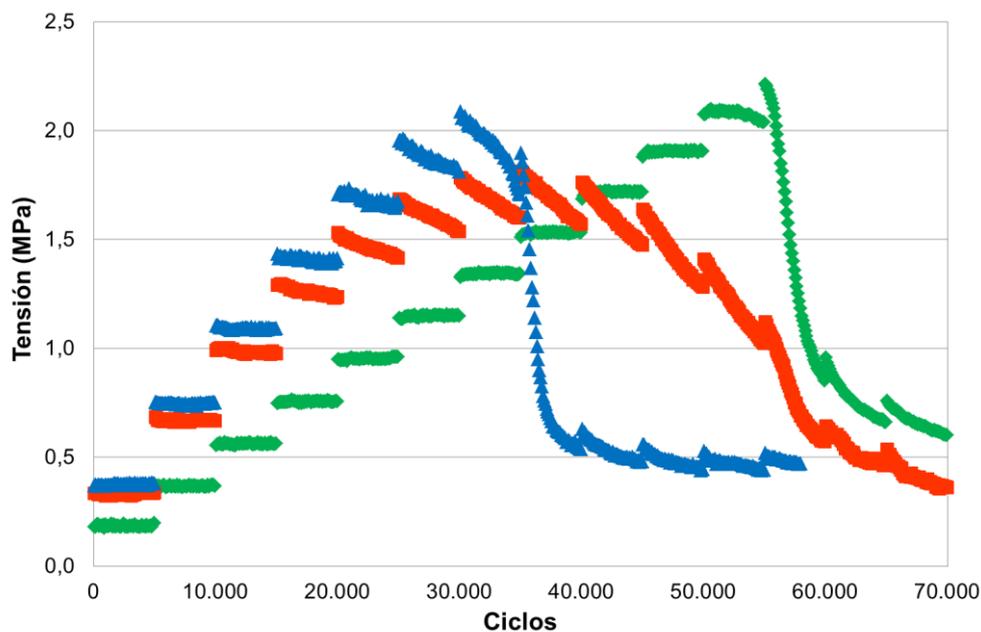


Figura 4.80. Evolución de la tensión con el número de ciclos en el ensayo EBADE a 5°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70.

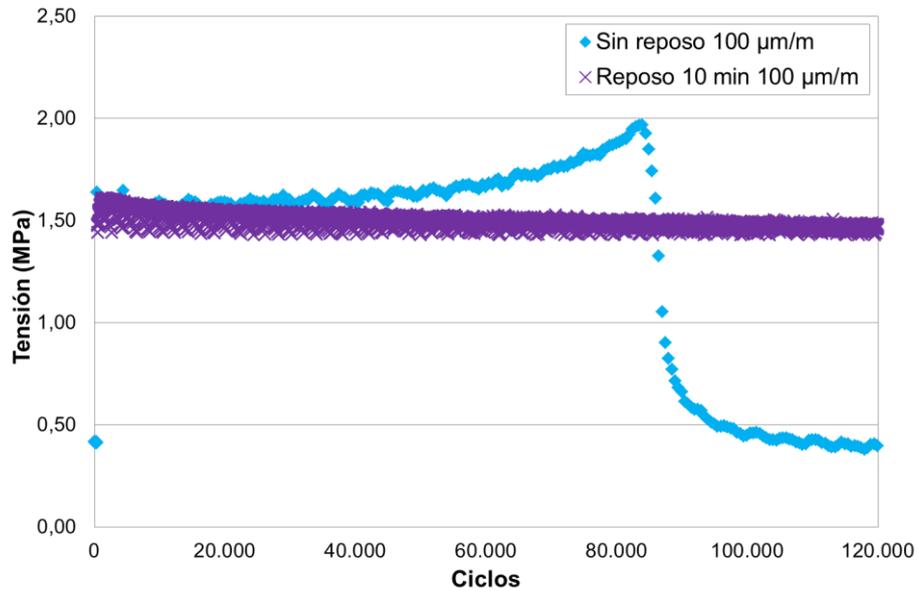


Figura 4.81. Evolución de la tensión en un ensayo de barrido de tiempo frente a la obtenida introduciendo periodos de reposo de 10 minutos cada 200 ciclos de carga. Caso 2: ensayos a $100\ \mu\text{m/m}$, 5°C y $10\ \text{Hz}$. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70.

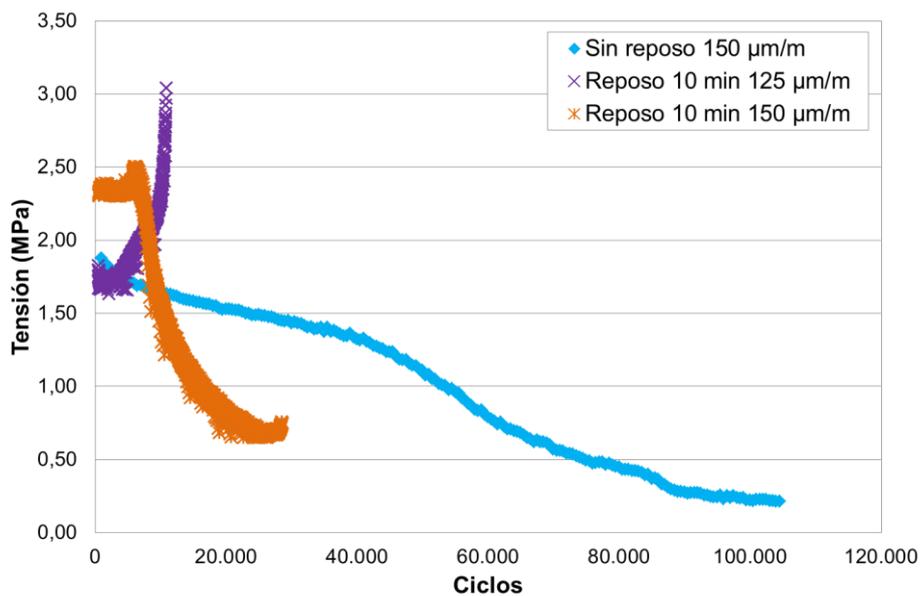


Figura 4.82. Evolución de la tensión en el ensayo de barrido de tiempo frente a la obtenida introduciendo periodos de reposo de 10 minutos cada 200 ciclos. Caso 3: ensayos a 125 y $150\ \mu\text{m/m}$, 5°C y $10\ \text{Hz}$. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70.

Los resultados de la evolución de la DED en los ensayos de barrido de tiempo con periodos de reposo de 10 minutos cada 200 ciclos para el caso 2 ($100\ \mu\text{m/m}$, 5°C y mezcla fabricada con betún 50/70) ponen de manifiesto que, al aplicar una sollicitación a una mezcla rígida no se observan cambios notables en los valores de la DED cuando la mezcla todavía no ha fallado (Figura 4.83). En el caso de la mezcla ensayada sin periodos de reposo, la rotura de la mezcla se

produce de forma brusca cuando la DED disminuye también de forma brusca. Cuando la mezcla es más dúctil (por ejemplo, cuando se ensaya a una temperatura más elevada, 20°C), su rotura se produce de forma más progresiva siendo capaz de soportar un mayor número de ciclos. En este caso, durante el proceso de fatiga la energía disipada va disminuyendo, sin producirse el fallo de la mezcla hasta que la DED se ha reducido considerablemente con respecto a su valor inicial. Así, al aplicar periodos de reposo durante el ensayo, parte del daño producido por la sollicitación aplicada es recuperado, tal y como se observa en el caso 1 (200 µm/m, 20°C y mezcla fabricada con betún 50/70), Figura 4.84.

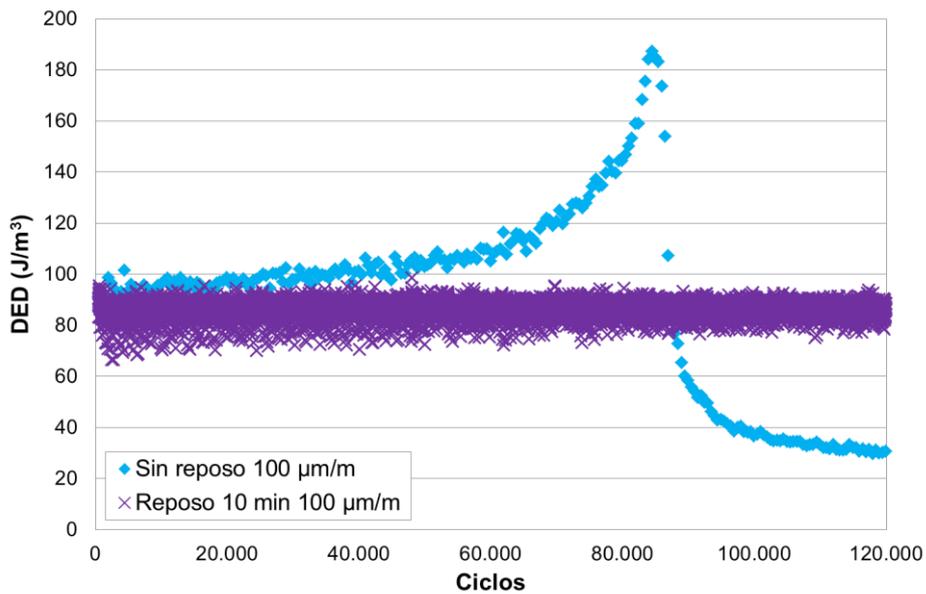


Figura 4.83. Evolución de la DED en el ensayo de barrido de tiempo con y sin introducir periodos de reposo de 10 minutos cada 200 ciclos. Caso 2: ensayos a 100 µm/m, 5°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70.

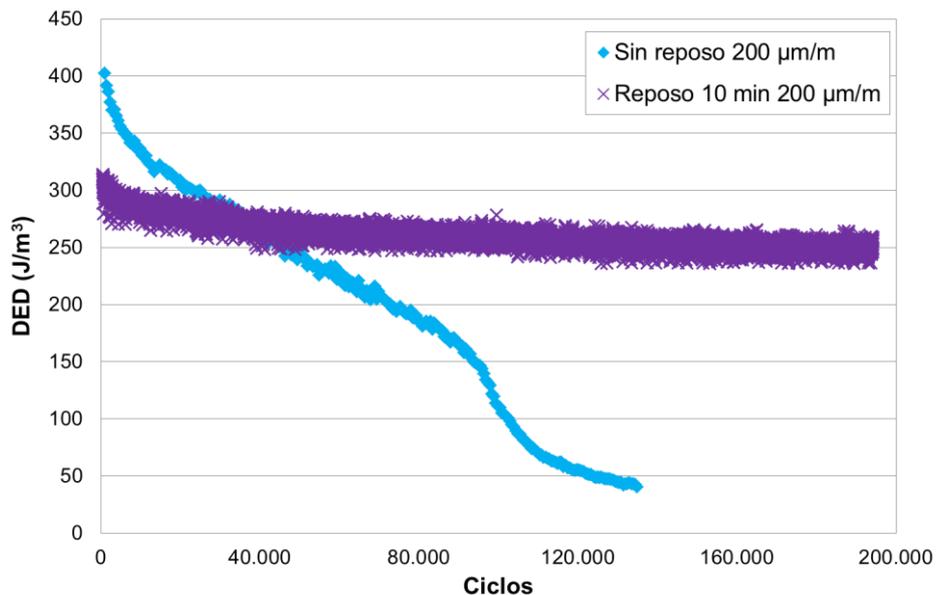


Figura 4.84. Evolución de la DED en el ensayo de barrido de tiempo con y sin introducir periodos de reposo de 10 minutos cada 200 ciclos. Caso 1: ensayos a 200 µm/m, 20°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70.

Al reducir el tiempo de reposo de 10 a 5 minutos, en el caso de la mezcla fabricada con 50/70 (Figura 4.85) los resultados en la evolución del módulo son similares a los obtenidos con los periodos de reposo de 10 minutos.

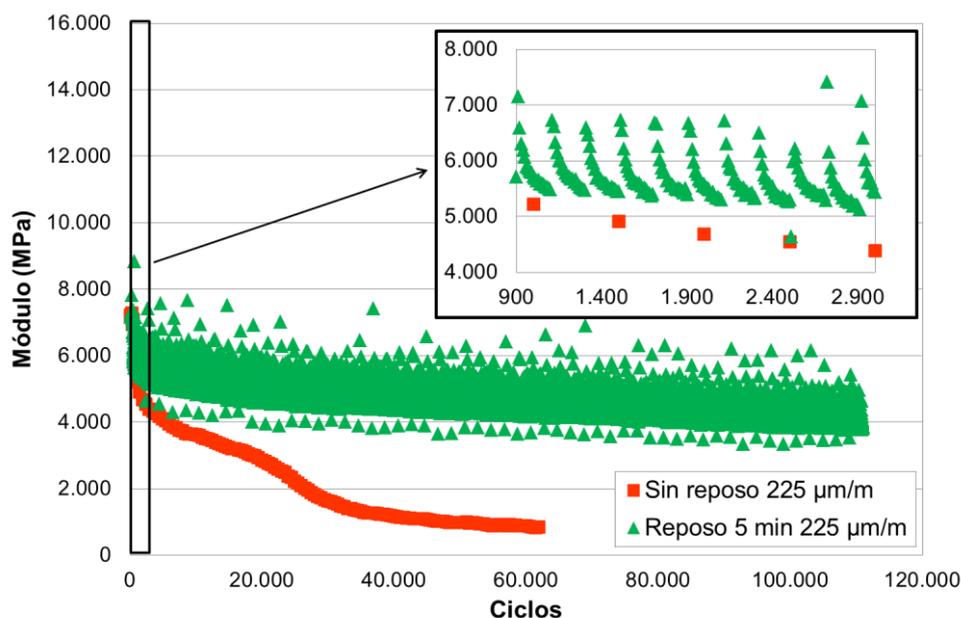


Figura 4.85. Evolución del módulo en el ensayo de barrido de tiempo frente a la obtenida introduciendo periodos de reposo de 5 minutos cada 200 ciclos. Caso 4: ensayos a 225 $\mu\text{m/m}$, 20°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 50/70.

Por otra parte, si la mezcla se fabrica con un ligante 15/25 y se ensaya a barrido de tiempo, introduciendo o no periodos de reposo de 5 minutos (Figura 4.86), los resultados son similares a los de la mezcla fabricada con betún 50/70 ensayada a 5°C: no se observan deterioros importantes durante el proceso de carga, ni recuperaciones en los periodos de reposo, comportándose el material como un sólido elástico. Aunque en este caso la introducción de periodos de reposo no tiene ningún efecto en la duración del ensayo, y su comportamiento es prácticamente similar al mostrado cuando no hay periodos de reposo, la mezcla muestra un comportamiento más frágil al introducir periodos de reposo.

Al envejecer la mezcla fabricada con el ligante 50/70, el módulo de la mezcla aumenta con respecto a la no envejecida. La Figura 4.87 muestra la evolución del módulo de la mezcla fabricada con ligante 50/70, envejecida, ensayada a 20°C mediante un barrido de tiempo con y sin la incorporación de periodos de reposo de 5 minutos cada 200 ciclos (Caso 6). Para la amplitud de deformación considerada (125 $\mu\text{m/m}$), la evolución del módulo para las dos configuraciones de ensayo es similar a la obtenida para la mezcla no envejecida (en este caso ensayada a una deformación de 225 $\mu\text{m/m}$). Aunque el módulo de la mezcla ha aumentado, no ha llegado a rigidizar la mezcla por completo, presentando un comportamiento viscoelástico

mediante el cual, al aplicar la sollicitación a la mezcla, su módulo disminuye, y cuando para la sollicitación, éste se recupera prácticamente en su totalidad.

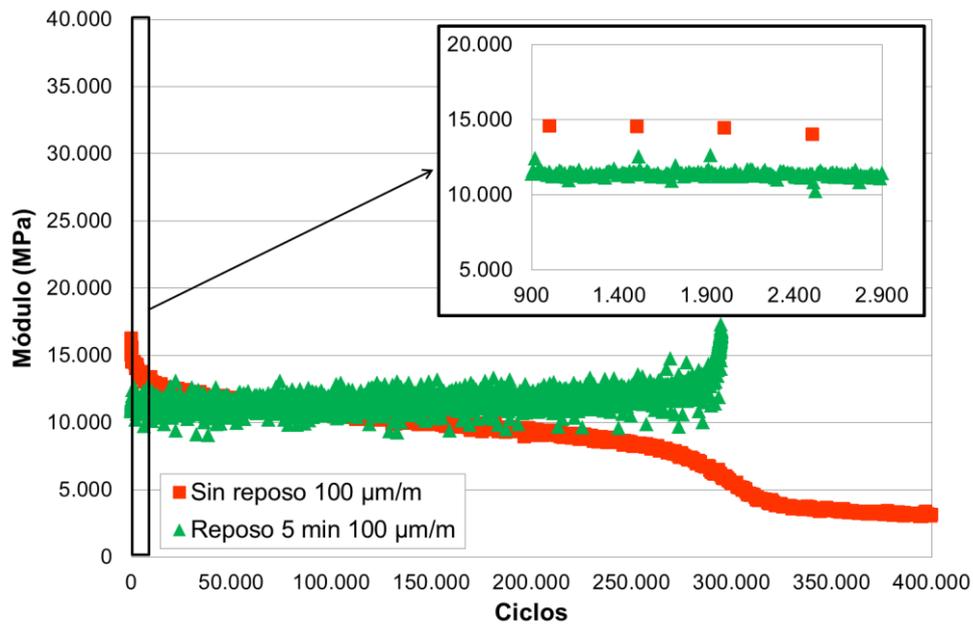


Figura 4.86. Evolución del módulo en el ensayo de barrido de tiempo frente a la obtenida introduciendo periodos de reposo de 5 minutos cada 200 ciclos. Caso 5: ensayos a 100 $\mu\text{m/m}$, 20°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 15/25.

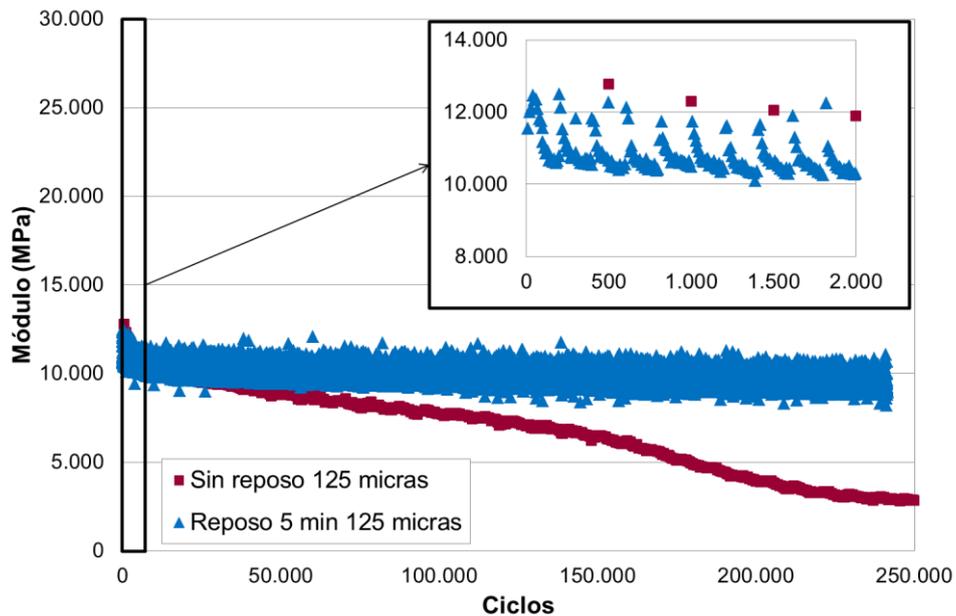


Figura 4.87. Evolución del módulo en el ensayo de barrido de tiempo frente a la obtenida introduciendo periodos de reposo de 5 minutos cada 200 ciclos. Caso 6: ensayos a 125 $\mu\text{m/m}$, 20°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A envejecida, fabricada con betún 50/70.

A raíz de los resultados obtenidos, se ha demostrado que la disminución del módulo observada en los ensayos realizados a temperaturas medias es reversible, es decir, puede ser recuperada al cesar la sollicitación. Sin embargo, esto depende de la duración de la sollicitación. Así, si en lugar de aplicar la sollicitación durante 200 ciclos, se aplicase durante 50.000 ciclos, Figura 4.88, no toda la reducción del módulo sería reversible. En este caso, una parte de la cantidad en la que se ha reducido el módulo se debe al daño debido a la aplicación de la carga, produciéndose la fatiga de la mezcla, y otra parte se debe a un proceso reversible, probablemente debido a la transformación de la energía disipada provocada por la sollicitación en calor. Botella, *et al.* [317] han demostrado que, en el caso de ligantes, este hecho se debe fundamentalmente al aumento de la temperatura interna del material, el cual es proporcional a la energía disipada por el mismo durante el ensayo.

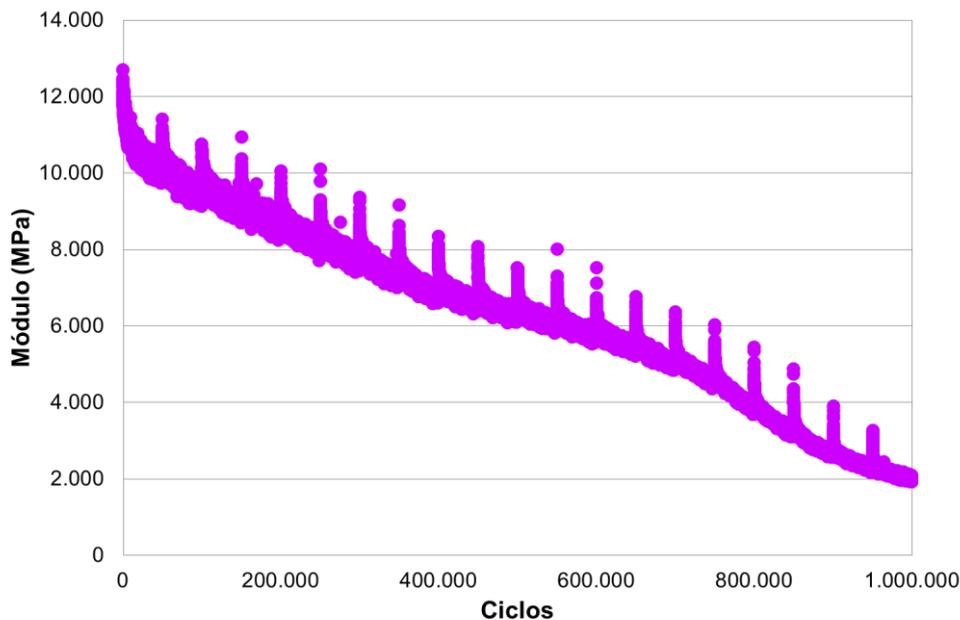


Figura 4.88. Evolución del módulo en el ensayo de barrido de tiempo introduciendo periodos de reposo de 60 minutos cada 50.000 ciclos. Caso 7: ensayo a 100 $\mu\text{m}/\text{m}$, 20°C y 10 Hz. Mezcla BBTM 11A fabricada con betún 15/25.

Capítulo 5.

Conclusiones (Conclusions)

En este capítulo se recogen las principales conclusiones derivadas del trabajo realizado durante el desarrollo de la presente tesis doctoral. Ésta ha tenido como objetivo analizar el efecto de los fenómenos de envejecimiento y de daño por humedad, así como el de la temperatura, en la resistencia a la fisuración de una mezcla asfáltica semidensa, fabricada con diferentes tipos de betún. Para ello, el estudio se ha dividido en tres partes. En la primera de ellas, se ha evaluado el efecto de estos fenómenos en la fractura y la fatiga de la mezcla a partir de los parámetros que caracterizan ambos procesos. La segunda parte se ha centrado en la evaluación de la fatiga de las mezclas a partir de la curva clásica de fatiga, y, en la última parte se ha evaluado el efecto de introducir periodos de reposo durante el proceso de sollicitación de la mezcla, en este caso, una mezcla discontinua, fabricada con distintos tipos de betún.

1. Conclusiones

1.1. Efecto del envejecimiento y de la acción del agua en la fisuración de la mezcla

La primera parte de este trabajo ha tenido como objetivo analizar el efecto del envejecimiento y de la acción del agua en el proceso de fisuración de la mezcla desde el punto de vista de la fractura y de la fatiga. El estudio de la fractura de la mezcla se ha realizado mediante el ensayo Fénix, mientras que para estudiar la fisuración por fatiga se ha usado el ensayo EBADE. Este proceso se ha analizado sobre una mezcla semidensa fabricada con dos

tipos de ligantes (50/70 y PMB 45/80-65), sometida a diferentes acondicionamientos (no acondicionada, envejecida, sometida a daño por humedad y envejecida sometida a daño por humedad) y ensayada a distintas temperaturas (20, 5 y -5°C). A partir de los resultados obtenidos pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- El envejecimiento provoca un cambio en la rigidez y en la forma en cómo rompen las mezclas, el cual queda reflejado en la variación de los parámetros del ensayo Fénix, aumentando los valores del índice de rigidez a la tracción y disminuyendo los valores del índice de tenacidad y de desplazamiento al 50% de la carga máxima.
- El cambio en la rigidez de la mezcla y, por tanto, en su comportamiento a fatiga, queda reflejado por los principales parámetros del ensayo EBADE, aumentando los valores del módulo inicial de la mezcla, disminuyendo los valores de deformación de fallo y observándose un comportamiento diferenciado en la evolución del módulo y de la densidad de energía disipada.
- A temperaturas medias, el tipo de ligante influye considerablemente en el comportamiento de la mezcla frente a la resistencia a fisuración. Sin embargo, a medida que la mezcla se envejece, o la temperatura disminuye, este efecto es menor, obteniendo resultados próximos para las mezclas fabricadas con cada uno de los ligantes considerados (50/70 y PMB 45/80-65).
- A medida que disminuye la temperatura aumenta la rigidez de la mezcla, la cual se vuelve más frágil. Este efecto es similar al producido por el envejecimiento.
- A temperaturas muy bajas, el efecto del envejecimiento es prácticamente nulo. Para estas temperaturas, la mezcla ha llegado a un valor máximo de rigidez, comportándose como un sólido completamente elástico.
- No se han observado diferencias significativas en el efecto del envejecimiento en la fisuración por fatiga de la mezcla al variar el tipo de árido usado en la fabricación de la mezcla (árido granítico en lugar de calizo) para una temperatura de ensayo de 20°C.
- Para el tipo de mezcla considerada en este trabajo, el daño por humedad ha sido mínimo, no habiéndose observado diferencias significativas entre los resultados para la mezcla no acondicionada y para la mezcla sometida a la acción del agua.
- Aun cambiando el tipo de árido de la mezcla por uno de tipo granítico, tampoco se han observado diferencias significativas entre la mezcla no acondicionada y la mezcla sometida a daño por humedad, así como al cambiar el tipo de fíller en la mezcla fabricada con árido granítico por uno de tipo arcilloso.
- Los resultados del estudio del efecto de la acción del agua obtenidos del ensayo Fénix se han verificado estudiando este fenómeno sobre el mismo tipo de mezcla a partir del ensayo de tracción indirecta, obteniendo conclusiones similares.

- Las diferencias obtenidas entre mezclas no acondicionadas y mezclas sometidas a envejecimiento y daño por humedad se deben principalmente al envejecimiento, siendo el efecto del daño por humedad en este tipo de mezcla, aún envejecida, prácticamente nulo.
- A raíz de los resultados obtenidos en el estudio de la fisuración a partir de los ensayos Fénix y EBADE se puede concluir que ambos permiten estudiar la resistencia a la fisuración de las mezclas, ya que permite diferenciar distintos comportamientos de la mezcla según la variable estudiada: tipo de ligante, acondicionamiento (envejecida y/o sometidas a daño por humedad) y temperatura de ensayo.

Durante la estancia realizada en el Instituto Superior Técnico de la Universidad de Lisboa se ha estudiado el efecto del envejecimiento mediante dos procedimientos (el definido por el SHRP, LTOA, y el desarrollado por la propia Universidad, TEAGE) y del daño por humedad en la resistencia a la fisuración de una mezcla cuyo ligante ha sido modificado con nanoarcilla y con nanopartículas de hierro. Para llevar a cabo este estudio se ha usado el ensayo de tracción indirecta, obteniendo las siguientes conclusiones:

- La resistencia a la tracción indirecta en las mezclas no acondicionadas aumenta al modificar el ligante con nanopartículas, en especial cuando el ligante es modificado con nanoarcilla.
- Cuando las mezclas son sometidas a daño por humedad, la resistencia a la tracción indirecta disminuye considerablemente.
- Analizando los valores del ratio de resistencia a la tracción indirecta, la mezcla modificada con nanopartículas de hierro muestra el mejor comportamiento frente a daño por humedad.
- Los valores de resistencia a la tracción indirecta aumentan con el envejecimiento debido al endurecimiento del ligante, independientemente del procedimiento de envejecimiento usado.
- El comportamiento de las mezclas se ve afectado por ambos procedimientos de envejecimiento, LTOA y TEAGE, mostrando una tendencia similar pero en diferentes grados. Este estudio ha demostrado la importancia de ajustar el proceso de envejecimiento en laboratorio al clima de la región donde se usarán las mezclas, tal y como hace el procedimiento TEAGE.
- A partir de los valores del índice de envejecimiento, la nanoarcilla parece retardar el proceso de endurecimiento debido al envejecimiento, pero cuando tiene lugar la combinación de envejecimiento y daño por humedad, las nanopartículas de hierro confieren a la mezcla un mejor comportamiento frente al endurecimiento del ligante,

aumentando la resistencia hasta cierto punto, sin perder consistencia ni las propiedades de la unión árido-ligante, siendo así más resistente frente al daño por humedad.

- El envejecimiento mediante el procedimiento TEAGE parece reproducir mejor el efecto de las condiciones ambientales en las mezclas, siendo posible adaptar el efecto del envejecimiento en las mezclas al número de años elegidos para analizar su comportamiento en una determinada región.

1.2. Leyes de fatiga

Tradicionalmente, la fisuración por fatiga se ha estudiado a partir de las leyes clásicas de fatiga del material, las cuales relacionan el número de ciclos hasta rotura con la deformación aplicada. El ensayo EBADE no permite relacionar ambas variables de forma directa. Por tanto, el siguiente objetivo de esta tesis doctoral ha sido el desarrollo y la validación de un procedimiento que permita obtener las leyes de fatiga clásicas mediante el ensayo EBADE. Para ello, las leyes de fatiga obtenidas mediante el ensayo EBADE a partir de este procedimiento han sido comparadas con las obtenidas a partir de un ensayo de barrido de tiempo a tracción-compresión sobre probetas de mezcla con la misma geometría que en el ensayo EBADE. Las principales conclusiones que se extraen se enumeran a continuación:

- Al analizar la variación del módulo con el número de ciclos en los ensayos de barrido de tiempo para determinar el momento en el que la mezcla rompe, se ha observado que el criterio de fallo convencional parece estar muy alejado del punto en el que realmente rompen la probetas.
- Al comparar algunos de los criterios de fallo definidos a lo largo de la literatura (criterio convencional, criterio de rotura en la fase III, criterio basado en la reducción de la DED máxima a la mitad y criterio del ratio de cambio de energía disipada, RDEC) se observa que el criterio de fallo convencional es el más restrictivo, seguido por el del 50% de la DED máxima, el criterio de rotura en el punto de transición entre la segunda a la tercera fase y, por último, el criterio del RDEC, siendo muy similares los resultados para los dos últimos. Además, se ha observado que las diferencias entre estos criterios son menores para la mezcla fabricada con betún convencional que para la fabricada con betún modificado, es decir, los criterios de fallo se acercan cuando la mezcla es más rígida.
- Al comparar la variación del módulo frente a la DED de la mezcla obtenida mediante el ensayo EBADE y mediante el ensayo de barrido de tiempo bajo distintas amplitudes de deformación se observa que en ambos casos las pendientes, para una misma

deformación, prácticamente coinciden. Esto pone de manifiesto la relación entre ambos ensayos.

- La estimación de las leyes de fatiga a partir de la deformación de fallo y de la deformación de no fallo establecidas en el ensayo EBADE permite la evaluación de la vida a fatiga de una mezcla de forma sencilla y rápida, lo cual pone de manifiesto la utilidad de este método a la hora de caracterizar el comportamiento de las mezclas, teniendo en cuenta el efecto de los distintos componentes de la mezcla, así como las condiciones que puedan darse en servicio.
- El parámetro ϵ_6 obtenido de las leyes de fatiga permite cuantificar el efecto de la temperatura y del envejecimiento en la vida a fatiga de la mezcla. Al disminuir la temperatura, las leyes de fatiga son más bajas y tendidas, por lo que ϵ_6 disminuye.
- A partir de las leyes de fatiga estimadas mediante el ensayo EBADE se obtienen resultados similares a los obtenidos a partir de los parámetros del ensayo: el envejecimiento en la mezcla produce un efecto similar al debido a la disminución de la temperatura de ensayo. La mezcla fabricada con betún modificado presenta una ley de fatiga más alta comparada con la misma fabricada con betún convencional; pero, cuando la mezcla es envejecida y ensayada a temperaturas bajas, no se observan cambios relevantes en el comportamiento de la mezcla en función del tipo de ligante.
- Al aplicar las leyes de fatiga en el cálculo de la vida de diferentes secciones de firme, se pone de manifiesto el efecto del espesor de la capa de mezcla; con espesores elevados, a medida que disminuye la temperatura y aumenta el envejecimiento, se obtiene más vida, mientras que con espesores pequeños ocurre lo contrario. Esto es debido al gran efecto que tiene el módulo en el comportamiento de las secciones gruesas, y que éste se supone constante a lo largo del proceso de fatiga.
- El ensayo EBADE permite realizar un proceso iterativo que considera el valor del módulo en función de la deformación, pudiendo obtener qué secciones serán críticas en función del estado del firme y las condiciones ambientales a las que se encuentre expuesto.
- El proceso iterativo que considera el valor del módulo en función de la deformación permite tener en cuenta el proceso de envejecimiento que sufren las mezclas a lo largo de su vida a fatiga, obteniendo resultados más realistas.
- Los resultados de las leyes de fatiga de las mezclas ponen de manifiesto la importancia de variables como la temperatura o el grado de envejecimiento de las mezclas en la vida a fatiga del material, variables que actualmente no se tienen en cuenta en el dimensionamiento de los firmes. El procedimiento desarrollado en este trabajo permite

de forma rápida y sencilla considerar todas estas variables en la fase de diseño de las secciones de firme.

Durante la estancia realizada en la Universidad de Nottingham se ha estudiado el efecto del envejecimiento en la resistencia a la fisuración de una mezcla fabricada con dos tipos de ligantes (convencional y modificado con polímeros), usando el ensayo a flexotracción de dos puntos. A partir de este trabajo se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Se han obtenido las leyes de fatiga de la mezcla no envejecida y envejecida fabricada con ligante convencional y ligante modificado con polímeros, observándose que para deformaciones bajas, independientemente del tipo de ligante, las leyes de fatiga de la mezcla no acondicionada y de la mezcla envejecida tienden a unirse.
- Al comparar las leyes de fatiga obtenidas a partir de los ensayos a flexotracción de dos puntos y de tracción-compresión considerando diferentes criterios de fallo, se ha observado que las obtenidas para los criterios de fallo del RDEC y de la fase III del módulo tienden a acercarse.
- A partir de los resultados de los ensayos de barrido de tiempo, tanto con el ensayo a flexotracción de dos puntos, como con el ensayo de tracción-compresión, ha sido posible determinar el parámetro denominado *Plateau Value* (PV), el cual proporciona una relación única con las leyes de fatiga para diferentes tipos de mezclas, modos de carga y niveles de carga.

1.3. Efecto de los periodos de reposo en la fatiga de las mezclas asfálticas

Por último, se ha analizado la posibilidad de que las mezclas no estén experimentando un daño irreversible en los primeros niveles de deformación, sino una reducción del módulo debido a efectos no lineales. Para ello, se han considerado dos configuraciones de ensayo: por un lado, un ensayo cíclico en el cual la amplitud de deformación va aumentando progresivamente (EBADE), pero al finalizar cada escalón de carga, la amplitud de deformación se reduce hasta el valor correspondiente al primer escalón de carga; y, por otro lado, se ha analizado el efecto de introducir periodos de reposo en un ensayo de barrido de tiempo. Las principales conclusiones de este estudio se muestran a continuación:

- Los resultados del ensayo EBADE con retorno, a temperaturas medias, en mezclas dúctiles, muestran que al disminuir la deformación al valor inicial, los valores de módulo se recuperan aunque no hasta el valor inicial, probablemente debido a la corta

duración de los escalones de carga. Al aumentar la rigidez de la mezcla, la tendencia varía completamente. En este caso, los valores del módulo son constantes a lo largo del ensayo hasta que se produce el fallo de la probeta, momento en el cual el valor del módulo disminuye bruscamente.

- Los resultados obtenidos al introducir periodos de reposo en el ensayo de barrido de tiempo a temperaturas bajas ponen de manifiesto un posible efecto negativo del proceso de carga no continuo sobre un pavimento rigidizado por efecto de la temperatura, pudiendo producirse su rotura para un periodo de tiempo inferior al calculado mediante los procedimientos clásicos para caracterizar el comportamiento a fatiga de las mezclas, los cuales normalmente se realizan a temperaturas medias.
- Se ha demostrado que la reducción del módulo observada en los ensayos con periodos de reposo realizados a temperaturas medias es reversible. Sin embargo, esto depende de la duración de la sollicitación.
- Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la importancia de considerar la secuencia de la aplicación de sollicitaciones en los ensayos de fatiga, ya que no es lo mismo aplicarlos de forma rápida y continuada (como es el caso de los ensayos de fatiga actuales) que aplicarlos de forma más lenta (como ocurre en la realidad en el firme de las carreteras).
- Los resultados obtenidos cuestionan que las leyes de fatiga obtenidas a partir de ensayos cíclicos continuos de fatiga puedan ser aplicadas directamente en el cálculo de la vida a fatiga de los firmes, ya que debería considerarse la secuencia de cargas.
- Al comparar el efecto de los periodos de reposo en el comportamiento de la mezcla al someterla a un proceso de fatiga se puede concluir que existe una alta probabilidad de que el fenómeno de *self-heating* cause la mayor parte de la pérdida de módulo observada en los ensayos cíclicos en mezclas asfálticas.

2. Futuras líneas de investigación

El trabajo desarrollado ha puesto de manifiesto que el uso de los ensayos Fénix y EBADE para caracterizar el comportamiento de las mezclas frente a la fisuración resulta muy interesante por las ventajas que ofrecen estos ensayos, entre las que destacan su sencillez y rapidez a la hora de ejecutarlos. Así, estos dos ensayos han permitido estudiar la resistencia a fisuración de una mezcla fabricada con dos tipos de ligante, sometida o no a envejecimiento y/o a daño por humedad, bajo distintas temperaturas de ensayo.

A lo largo del desarrollo de esta investigación han surgido nuevas líneas que pueden contribuir a mejorar y ampliar el conocimiento del comportamiento a fisuración de las mezclas asfálticas. Así se proponen las siguientes líneas de investigación:

- Estudiar el efecto del daño por humedad en la resistencia a la fisuración de distintos tipos de mezclas a partir de los ensayos Fénix y EBADE. Se sabe que el daño por humedad es un problema importante responsable en gran parte del deterioro prematuro que sufren las carreteras. Sin embargo, la mezcla usada en este trabajo no ha permitido estudiar este efecto en profundidad, al no verse afectada por la acción del agua. Es por ello que el fenómeno del daño por humedad debería ser estudiado en profundidad usando otro tipo de mezclas más susceptibles a la acción del agua.
- Ampliar el estudio del efecto de la introducción de periodos de reposo en la fisuración por fatiga de la mezcla. En este trabajo, se ha demostrado la importancia de este efecto, lo cual supone el punto de partida hacia una investigación más profunda y detallada de la influencia de la inclusión de periodos de reposo.
- Evaluación del efecto de las tensiones térmicas en la resistencia a fisuración de las mezclas. Durante este trabajo se ha puesto de manifiesto la importancia del efecto de la temperatura a la hora de evaluar la resistencia a la fisuración de las mezclas. Sin embargo, las mezclas asfálticas en servicio se ven expuestas a cambios de temperatura que provocan tensiones, las cuales en la actualidad no se están evaluando a la hora de caracterizar y dimensionar los firmes de las carreteras.

Conclusions

This chapter contains the main conclusions derived from the research carried out during the development of this phd thesis. The objective of this thesis was to analyze the effect of ageing and moisture damage phenomena as well as temperature on the cracking resistance of a semi-dense asphalt mixture made with different types of bitumen. For this aim, the study was divided into three parts. In the first part, the effect of these phenomena on the mixture fracture and fatigue was evaluated using the parameters that characterize both processes. The second part was focused on the evaluation of mixtures fatigue from the classic fatigue laws. And, in the last part, the effect of the inclusion of rest periods during the mixture load process (for this case, a gap-graded mixture, manufactured with different types of bitumen) was evaluated.

1. Conclusions

1.1. Effect of ageing and the action of water on the mixture cracking

The first part of this thesis was aimed to analyze the effect of ageing and the action of water in the mixture cracking process from the point of view of fracture and fatigue. The study of the mixture fracture was carried out with the Fénix test while EBADE test was used to study fatigue cracking. Both processes were analyzed in a semi-dense mixture manufactured with two types of binders (50/70 and PMB 45/80-65) subjected to different conditioning (unconditioned, aged, subjected to moisture damage and aged subjected to moisture damage) and tested at different temperatures (20°C, 5°C and -5°C). The following conclusions are obtained from the results:

- Ageing causes a change in the mixture stiffness and in the way mixtures fail which is shown in the variation of the Fénix test parameters. The tensile stiffness index values increase, while the tenacity index and the displacement to 50% of the maximum load values decrease.
- The change in the mixture stiffness and, therefore, in its fatigue behavior, is shown by the main parameters obtained from the EBADE test. The initial modulus values of the mixture increase, the strain values to failure decrease and a differentiated behavior in the evolution of the complex modulus and the dissipated energy density is observed.

- At medium temperatures, the binder type has a considerable influence on the mixture behavior against cracking resistance. However, as the mixture ages or the temperature decreases, this effect is lower obtaining close results for the mixture made with each of the binders considered (50/70 and PMB 45/80-65).
- As temperature decreases, the mixture stiffness increases becoming more brittle. This effect is similar to the one produced by ageing.
- At very low temperatures, the effect of ageing is almost zero. For these temperatures, the mixture has reached a maximum stiffness value behaving completely like an elastic solid.
- No significant differences are observed in the effect of ageing on the mixture fatigue cracking when varying the aggregate type used in the mixture manufacture (granite aggregate instead of limestone) for a test temperature of 20°C.
- For the mixture type considered in this research, moisture damage is minimum. No significant differences are observed between the results for the unconditioned mixture and for the mixture subjected to the action of water.
- No significant differences are observed between the unconditioned mixture and the mixture subjected to moisture damage even when the aggregate type of the mixture is changed to a granite, as well as when the type of filler in the mixture made with granitic aggregate is changed for a clay one.
- The results from the study of the effect of the action of water with the Fénix test were verified studying this phenomenon from the indirect tensile test obtaining similar conclusions.
- The differences observed between unconditioned mixtures and aged mixtures subjected to moisture damage are mainly due to ageing. The effect of moisture damage in this type of mixture, even aged, is insignificant.
- Due to the results obtained in the study of cracking from the Fénix and EBADE tests, it can be concluded that both allow the cracking resistance of mixtures to be studied since they let different behaviors of the mixture to be differentiated according to the studied variable: binder type, conditioning (subjected to moisture damage, aged or subjected to moisture damage after ageing) and test temperature.

During the stay at the Instituto Superior Técnico of the University of Lisbon, the effect of ageing by two procedures (the defined by the SHRP, LTOA, and the developed by the University itself, TEAGE) and moisture damage on the cracking resistance of a mixture whose binder was modified with nanoclay and nanoiron was studied. The indirect tensile test was used to carry out this study obtaining the following conclusions:

- Indirect tensile strength of unconditioned mixtures increases when the binder is modified with nanoparticles, especially when the binder is modified with nanoclay.
- When mixtures are subjected to moisture damage, the indirect tensile strength decreases considerably.
- The nanoiron modified mixture shows the best behavior against moisture damage when the values of the indirect tensile strength ratio are analyzed.
- The indirect tensile strength values increase with ageing due to the hardening of the binder, regardless of the ageing procedure used.
- The mixtures behavior is affected by both ageing procedures, LTOA and TEAGE, showing a similar trend but in different degrees. This study has demonstrated the importance of adapting the ageing process in laboratory to the climate in the area where the mixtures will be used, as the TEAGE procedure does.
- From the ageing index values, nanoclay seems to retard the hardening process due to ageing. However, when the combination of ageing and moisture damage occurs, the nanoiron gives the mixture a better behavior against the hardening of the binder. These nanoparticles increase the strength to a certain point without losing consistency on the aggregate-binder bond properties, being more resistant to moisture damage.
- Ageing due to TEAGE procedure seems to reproduce better the effect of environmental conditions in the mixtures, being possible to adapt the effect of ageing to the number of years chosen to analyze mixture behavior in a certain area.

1.2. Fatigue laws

Traditionally, fatigue cracking is studied from the classic fatigue laws of the material. They relate the number of cycles to failure with the applied strain. The EBADE test does not allow both variables to be related directly. Therefore, the next objective of this thesis was the development and validation of a procedure that let the classic fatigue laws to be obtained from the EBADE test. To this aim, the fatigue laws obtained with this procedure from the EBADE test were compared with those obtained from a tension-compression time sweep test on mixture specimens with geometry similar to those for the EBADE test. The main conclusions extracted from this study are listed below:

- The conventional failure criterion seems to be far from the point where specimens really break when the variation of the modulus with the number of cycles in the time sweep tests to determine the moment when the mixture fails is analyzed.

- Comparing some of the failure criteria defined throughout the literature (conventional criterion, criterion of failure in phase III, criterion based on the maximum DED reduction in half and criterion of the ratio of the dissipated energy change, RDEC), it is observed that conventional criterion is the most restrictive, followed by the 50% of the maximum DED, the failure criterion at the modulus evolution transition between phase II and phase III, and finally the criterion of the RDEC. Results are very similar for the last two criteria. Furthermore, differences between these criteria are lower for the mixture made with conventional bitumen than for that made with modified bitumen. That is, failure criteria are closer when the mixture is more rigid.
- Comparing the variation of the modulus with the DED of the mixture obtained from EBADE test and from the time sweep test under different strain amplitudes, the slopes for the same strain are observed to practically coincide. This highlights the relationship between both tests.
- The estimation of fatigue laws from the failure strain and the no damage strain established from the EBADE test allows the evaluation of a mixture fatigue life in a simple and fast way. The usefulness of this method to characterize the mixtures behavior taking into account the effect of different components of the mixture as well as conditions that may occur in service is showed.
- The ε_6 parameter obtained from the fatigue laws allows the effect of temperature and ageing on the mixture fatigue life to be quantified. When temperature decreases, fatigue laws are lower and flatter, so the ε_6 parameter decreases.
- Fatigue laws estimated from EBADE test show similar results to those obtained from the parameters of the test: ageing of the mixture has an effect on its behavior similar to that due to the decrease of test temperature. The mixture made with modified bitumen has a higher fatigue law compared with the same mixture made with conventional bitumen. However, no significant changes in the mixture behavior depending on the binder type are observed when the mixture is aged and tested at low temperatures.
- When fatigue laws are applied in the pavement lifespan calculation of different sections, the effect of the mixture layer thickness is made clear. For a high thickness layer of bituminous mixture, fatigue life is greater as temperature decreases and the mixture is aged. The opposite is shown for a thin layer. This is due to the large effect of the modulus on the behavior of thick layers. Besides, a constant modulus is assumed throughout the fatigue process.
- EBADE test allows an iterative procedure to be conducted where the modulus value changes according to the strain. This process is able to obtain critical sections

depending on the state of the pavement and the environmental conditions under which pavement will be exposed.

- The iterative procedure that considers the value of the modulus as a function of the strain allows the ageing process suffered by the mixtures during their fatigue life to be taken into account. This lets to obtain more realistic results.
- Results from the mixtures fatigue laws show the importance of variables such as the temperature or ageing on the mixtures fatigue life. They are not currently considered in the pavement design. The procedure developed allows in an easy and fast way to consider all these variables in the design stage of the pavement sections.

During the stay at the University of Nottingham, the effect of ageing on the cracking resistance of a mixture made with two types of binders (conventional and polymers modified) was studied using the two point bending test. From this work, the following conclusions are obtained:

- Fatigue laws of unconditioned and aged mixtures manufactured with conventional and polymer modified binder were obtained. For small strains, fatigue laws of the unconditioned and aged mixtures tend to join regardless the type of binder.
- Comparing fatigue laws obtained from the two point bending test and the tension-compression test considering different failure criteria, it is observed that those obtained for the RDEC failure criterion and the phase III of the modulus evolution criterion tend to get closer.
- The parameter called Plateau Value (PV) was obtained from the time sweep tests results (both two point bending test and tension-compression test). It provides a unique relationship with fatigue laws for different mixture types, loading modes and loading levels.

1.3. Effect of rest periods on the fatigue of asphalt mixtures

Finally, the possibility that mixtures are not experiencing irreversible damage during the first levels of deformation but a reduction of the modulus due to nonlinear effects was analyzed. To do this, two test configurations were considered. On the one hand, a cyclic test in which the strain amplitude increases progressively (EBADE) but at the end of each load step the strain amplitude is reduced to the corresponding value to the first. On the other hand, the effect of introducing rest periods in a time sweep test was analyzed. The main conclusions of this study are shown below:

- Results of EBADE test with return to the initial step in ductile mixtures at medium temperatures show that modulus values are recovered when the strain decreases although not until its initial value. This is probably due to the short duration of the loading steps. By increasing mixture stiffness, the trend varies completely. In this case, the modulus values are constant throughout the test until the failure of the specimen occurs. In that moment, the modulus values decrease sharply.
- Results obtained by introducing rest periods in the time sweep test at low temperatures reveal a possible negative effect of the non-continuous loading process on a pavement stiffened by the effect of temperature. Its failure can happen for a period of time lower than the obtained by classical procedures to characterize the mixtures fatigue behavior. These procedures are normally carried out at average temperatures.
- It is shown that the reduction of the modulus observed in tests with rest periods performed at average temperatures is reversible. However, this depends on the duration of the applied load.
- Results show the importance of considering the sequence of the load application in fatigue tests. It is not the same applying them quickly and continuously (as the case of current fatigue tests) than applying them in a slower way (as it happens in the reality on the road surface).
- Results question whether fatigue laws obtained from continuous cyclic fatigue tests can be directly applied in the calculation of the fatigue life of pavements, since load sequence should be considered.
- Comparing the effect of rest periods on the mixture behavior when it is subjected to a fatigue process leads to the conclusion that there is a high probability than the phenomenon of self-heating causes most of the modulus loss observed in cyclic test of asphalt mixtures.

2. Future research lines

The research developed here shows that the use of the Fénix and the EBADE tests to characterize the behavior of the mixtures against cracking is very interesting due to the advantages they offer. The simplicity and the execution speed of these two tests highlights among their advantages. Thus, they allow the cracking resistance of a mixture made with two types of binder, subjected or not to ageing and/or moisture damage and under different test temperatures to be studied.

Throughout the development of this research, new lines that can contribute to improve and expand the knowledge of cracking behavior of asphalt mixtures have emerged. In this way, the following research lines are proposed:

- Studying the effect of moisture damage on the cracking resistance of different types of mixtures using Fénix and EBADE tests. It is known that moisture damage is a major problem responsible for a great part of the premature deterioration of roads. However, the mixture used in this work has not let this effect to be studied in depth as it is not affected by the action of water. This is why the phenomenon of moisture damage should be studied in depth using other types of mixtures more susceptible to the action of water.
- Broadening the study of the effect of introducing rest periods on the fatigue cracking of mixtures. In this thesis, the importance of this effect has been demonstrated. This is the starting point towards a deeper and more detailed investigation of the influence of the inclusion of rest periods.
- Evaluation of the effect of thermal stresses on the cracking resistance of mixtures. During this research, the importance of the effect of temperature in the evaluation of mixtures cracking resistance is shown. However, asphalt mixtures in service are exposed to temperature variations that cause stresses, which currently are not evaluated when the roads pavements are characterized and designed.

Referencias Bibliográficas

- [1] F. Pérez y A. Bardesi, 2006. Manual para la caracterización de ligantes y másticos bituminosos, Repsol YPF. Primera edición.
- [2] G. Airey, 2003. State of the Art Report on Ageing Test Methods for Bituminous Pavement Materials, *Int J Pavement Eng* 4(3):156-176.
- [3] B. Sengoz y E. Agar, 2007. Effect of asphalt film thickness on the moisture sensitivity characteristics of hot-mix asphalt, *Build Environ* 42:3621-3628.
- [4] O. Kim, C. Bell, J. Wilson y G. Boyle, 1987. Development of laboratory oxidative aging procedures for asphalt cements and asphalt mixtures, *Transport Res Rec*, 1115:101-112.
- [5] R. Tino, B. González y J. Toribio, 2008. Comportamiento en fatiga de mezclas bituminosas en caliente para refuerzo de firmes, *Anales de mecánica de la fractura* 2(25):730-735.
- [6] R. Botella, F. Pérez-Jiménez y R. Miró, 2012. Application of a strain sweep test to assess fatigue behavior of asphalt binders, *Constr Build Mater* 36:906-912.
- [7] R. Abu Al-Rub, M. Darabi, S. Kim, D. Little y C. Glover, 2013. Mechanistic-based constitutive modeling of oxidative aging in aging susceptible materials and its effect on the damage potential of asphalt concrete, *Constr Build Mater* 41:439-454.
- [8] G. Kemp y N. Predoehl, 1981. A comparison of field and laboratory environments of asphalt durability, *Proc Assoc Asphalt Paving Technol* 50:492-537.
- [9] J. Welborn, 1984. Physical properties as related to asphalt durability: state of the art, *Transport Res Rec* 999:31-36.
- [10] J. Shiau, M. Tia, B. Ruth y G. Page, 1991. Characterization of age hardening potential of asphalt by using Corbett Swarbrick Asphalt Fractionation Test, *Transport Res Rec*, 1323:53-60.
- [11] H. Khalid, 2002. A new approach for the accelerated ageing of porous asphalt mixtures, *Proc Institution Civil Engineers*, 153(3):171-181.

- [12] S. Said, 2005. Aging effect on mechanical characteristics of bituminous mixtures, *Transport Res Rec* 1901:1-9.
- [13] J. Shen, S. Amirkhanian y B. Tang, 2006. Influence of accelerated aging test temperature on the properties of binders, *Int J Pavement Eng* 7(3):191-198.
- [14] Q. Lu y J.T. Harvey, 2006. Field investigation of factors associated with moisture damage in asphalt pavements, *Proc 10th Int Conference Asphalt Pavements (ISAP)*, 691-700.
- [15] Q. Lu y J. T. Harvey, 2006. Evaluation of moisture sensitivity of hot mix asphalt by flexural beam fatigue tests, *Asphalt Concrete (ASCE)*, 124-133.
- [16] Asphalt Institute, 1983. Principles of Construction of Hot Mix Asphalt Pavements, *Manual Series No 22*.
- [17] F. Farcas, 1996. Etude d'une Méthode de Simulation du Vieillissement sur Route des Bitumes, Tesis doctoral, Universidad de París.
- [18] B. Vallerga, 1981. Pavement deficiencies related to asphalt durability, *Proc Assoc Asphalt Paving Technol* 50:481-491.
- [19] H. Rondón y F. Reyes, 2012. Evaluation of mechanical parameters of an asphalt mixture under the environmental conditions of Bogotá D.C., *Rev Ing Constr* 27(1):57-74.
- [20] R. Schmidt y L. Santucci, 1969. The effect of asphalt properties on the fatigue cracking of asphalt concrete on the Zaca-Wigmoretest Project, *Proc Assoc Asphalt Paving Technol* 38:39-64.
- [21] J. Wu, 2009. The influence of mineral aggregates and binder volumetrics on bitumen ageing, Tesis doctoral, Universidad de Nottingham.
- [22] X. Lu, Y. Talon y P. Redelius, 2008. Aging of bituminous binders - Laboratory tests and field data, *Proc 4th Euroasphalt & Eurobitume Congress*.
- [23] Z. Arega, A. Bhasin y T. De Kesel, 2013. Influence of extended aging on the properties of asphalt composites produced using hot and warm mix methods, *Constr Build Mater* 44:168-174.
- [24] I. Tonial, 2001. Influência do Envelhecimento do Revestimento Asfáltico na Vida da Fadiga de Pavimentos, *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [25] G. Ramond y C. Such, 1990. Bitumes et Bitumes Modifiés - Relations Structures, Propriétés Composition, *Bull liaison labo P et Ch*, 168:65-87.
- [26] D. Zhao, 2011. Evolution de l'Adhérence des Chaussées: Influence des Matériaux, du Vieillissement et du trafic - Variations Saisonnières, *Thèse de l'École Doctorale Science pour l'Ingénieur*.
- [27] W. Van der Bergh, 2011. The Effect of Ageing on the Fatigue and Healing Properties of Bituminous Mortars, Tesis doctoral, TUDelf.
- [28] D. Swiertz, 2010. Asphalt aging characteristics, Rheological implications and laboratory techniques, Universidad de Wisconsin.

-
- [29] J. Read y D. Whiteoak, 2003. *The Shell Bitumen Handbook*, 5th ed. London, England: Thomas Telford Publishing, Shell Bitumen UK.
- [30] D. Lesueur, 2008. The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification, *Adv Colloid Interface Sci* 145(1-2):42-82.
- [31] C. Bell, 1989. SHRP-A/IR-89-004: Summary report on ageing of asphalt-aggregate systems, SHRP.
- [32] D. Christensen y D. Anderson, 1992. Interpretation of dynamic mechanical test data for paving grade asphalt cements, *Proc Assoc Asphalt Paving Technol* 61:67-116.
- [33] D. Lee y R. Huang, 1973. Weathering of asphalts as characterized by infrared multiple internal reflection spectra, *Appl Spectrosc* 27(6):435-440.
- [34] C.K. Lau, K.M. Lunsford, C.J. Glover, R.R. Davison y J.A. Bullin, 1992. Reaction Rates and Hardening Susceptibilities as determined from POV aging of asphalts, *Transport Res Rec* 1342:50-57.
- [35] J.C. Petersen, J.F. Branthaver, R.E. Robertson, P.M. Harnsberger, J.J. Duvall y E.K. Ensley, 1993. Effects of physicochemical factors on asphalt oxidation kinetics, *Transport Res Rec* 1391:1-10.
- [36] C.J. Glover, R.R. Davison, C.H. Domke, Y. Ruan, P. Juristyarini, D.B. Knorr y S.H. Jung, 2005. Development of a new method for assessing asphalt binder durability with field validation, Texas Transportation Institute, Report No FHWA/TX-05/1872-2.
- [37] U. Isacson y H. Zeng, 1997. Relationships between Bitumen chemistry and low temperature behavior of asphalt, *Constr Build Mater* 11(2):83-91.
- [38] M. Mirza y M. Witczak, 1995. Development of a global aging system for short term and long term aging of asphalt cements, *Proc Assoc Asphalt Paving Technol* 64:393-430.
- [39] R. Bonaquist, 2011. Mix design practices for warm mix asphalt, NCHRP.
- [40] X. Vargas y F. Reyes, 2010. El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos, *Ing Investig* 30(3):27-44.
- [41] W. Fernández-Gómez, H. Rondón y F. Reyes, 2011. Envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas: estado del conocimiento.
- [42] R. Miró y F. Pérez, 2001. Procedure for the evaluation of asphalt binders in contact with aggregates and application of this procedure to analyze the influence of the aggregate type of binder ageing, *Road Mater Pavement* 2(1):97-110.
- [43] Y. Jemere, 2010. Development of a laboratory ageing method for bitumen in porous asphalt. Tesis doctoral, TUDelf.
- [44] J. Wu y G. Airey, 2009. The influence of aggregate interaction and aging procedure on bitumen aging, *J Test Eval* 37(5):402-409.
- [45] K. Kanitpong y H. Bahia, 2008. Evaluation of HMA moisture in Wisconsin as it relates to pavement performance, *Int J Pavement Eng* 9(1):9-17.

- [46] H. Bianchetto, R. Miró y F. Pérez, 2006. Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: beneficios y limitaciones de la incorporación de fílleres comerciales. Primera parte: estudios en base al método UCL, Carreteras 147:27.
- [47] E. Hajj, P. Sebaaly y D. Weitzel, 2005. Fatigue Characteristics of Superpave and Hveem Mixtures, J Transport Eng 131:302-310.
- [48] H. Lubbers, 1985. Bitumen in de weg- en waterbouw. Gouda: Nederlands Adviesbureau voor Bitumentoepassingen.
- [49] L. Francken, A. Vanelstraete y A. Verhasselt, 1997. Long-term ageing of pure and modified bitumen: influence on the rheological properties and relation with mechanical performance of asphalt mixtures. Seattle: ISAP.
- [50] FEHRL, 2006. BitVal - Analysis of Available Data for Validation of Bitumen Tests, Report on Phase 1 of the BiTVal Project, Forum of European National Research Laboratories. TRL, UK: Cliff Nicholls.
- [51] S. Dessouky, C. Reyes, M. Ilias, D. Contreras y A.T. Papagiannakis, 2011. Effect of pre-heating duration and temperature conditioning on the rheological properties of bitumen, Constr Build Mater 25(6):2785-2792.
- [52] M. Araújo, V. Lins y V. Pasa, 2011. Effect of Ageing on Porosity of Hot Mix Asphalt, Braz J Petroleum Gas 5(1):11-18.
- [53] F. Durrieu, F. Farcas y V. Mouillet, 2007. The influence of UV aging of a Styrene/Butadiene/Styrene modified bitumen: Comparison between laboratory and on site aging, Fuel 86:1446-51.
- [54] L. Corbett, 1970. Relationship between composition and physical properties of asphalt, Proc Assoc Asphalt Paving Technol 39:481-491.
- [55] M. Paliukaite, A. Vaitkus y A. Zofka, 2014. Evaluation of bitumen fractional composition depending on the crude oil type and production technology, 9th Conference Environ Eng, enviro.2014.162.
- [56] I. Ishai, B. Brulé, J. Vaniscote y G. Ramond, 1988. Some rheological and physico-chemical aspects of long term asphalt durability, Proc Assoc Asphalt Paving 57.
- [57] E. Hagos, 2008. The effect of Aging on Binder Properties of Porous Asphalt Concrete, Tesis doctoral, TUDelft.
- [58] J. Huet, 1989. Spectrographie infrarouge et composition chimique globale des bitumes en cours d'evolution dans des sections routières experimentales, 4th Eurobitume Symp 1.3.
- [59] J. Pauls y J. Welborn, 1952. Studies of the Hardening Properties of Asphaltic Materials, Proc Assoc Asphalt Paving Technol 21:48-75.
- [60] J. Daniel y A. Lachance, 2005. Mechanistic and volumetric properties of asphalt mixtures with recycled asphalt pavement, Transport Res Rec 1929:26-8.

-
- [61] M. Kane, D. Zhao, E. Chailleux, F. Delarrard y M. Do, 2013. Development of an accelerated pavement test reproducing the effect of natural aging on skid resistance, *Road Mater Pavement* 14(1):126-140.
- [62] M. Lopes, D. Zhao, E. Chailleux, M. Kane, T. Gabet, C. Petiteau y J. Soares, 2014. Characterisation of ageing processes on the asphalt mixture surface, *Road Mater Pavement* 15(3):477-487.
- [63] R. Lewis y J. Welborn, 1940. Report on the properties of the residues of 50-60 and 85-100 penetration asphalts from oven tests and exposure, *Proc Assoc Asphalt Paving Technol* 11:86-157.
- [64] ASTM, 1995. D1754-94: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on Asphaltic Materials (Thin Film Oven Test).
- [65] EN 12607-2:2007. Betunes y ligantes bituminosos. Determinación de la resistencia al envejecimiento por efecto del calor y del aire. Parte 2: Método TFOT (película fina).
- [66] A. Edler, M. Hattingh, V. Servas y C. Marais, 1985. Use of ageing tests to determine the efficacy of hydrated lime additions to asphalt in retarding its oxidative hardening, *Proc Assoc Asphalt Paving Technol* 54:118-139.
- [67] F. Hveem, E. Zube y J. Skog, 1963. Proposed new tests and specifications for paving grade asphalts, *Proc Assoc Asphalt Paving Technol* 32:271-327.
- [68] AASHTO T240-13, 2017. Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test).
- [69] ASTM D2872 - 12e1. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test).
- [70] UNE-EN 12607-1:2007. Betunes y ligantes bituminosos. Determinación de la resistencia al envejecimiento por efecto del calor y del aire. Parte 1: Método RTFOT (película fina y rotatoria).
- [71] G. Parmeggiani, 2000. Nitrogen rolling thin film oven test, *Proc 2nd Euroasphalt & Eurobitume Congress, Session 2: Development in Bituminous products and Techniques*, 432-437.
- [72] DIN 52016, 1988. Testing the thermal stability of bitumen in a rotating flask.
- [73] UNE-EN 12607-3:2015. Betunes y ligantes bituminosos. Determinación de la resistencia al endurecimiento por efecto del calor y del aire. Parte 3: Método RFT (rotovapor).
- [74] R. Griffin, T. Miles y C. Penther, 1955. Microfilm durability test for asphalt, *Proc Assoc Asphalt Paving Technol* 24:31-62.
- [75] R. Traxler, 1963. Durability of asphalt cements, *Proc Assoc Asphalt Paving Technol* 32:44-58.
- [76] W. Halstead y J. Zenewitz, 1961. Changes in asphalt viscosities during thin-film oven and microfilm durability tests, *Public Roads* 31(11):211-218.

- [77] Schmidt, R., 1973. Laboratory measurement of the durability of paving asphalts. ASTM STP 532, 79-99.
- [78] R. McHattie, 1983. Estimating the durability of Chem-Crete Modified Paving Asphalt, Alaska Department of Transportation.
- [79] J. Petersen, 1989. A thin film accelerated aging test for evaluation asphalt oxidative aging, *Transport Res Rec* 58:220-237.
- [80] H. Bahia, W.P. Hislop, H. Zhai y A. Rangel, 1998. Classification of asphalt binders into simple and complex binders, *Proc Assoc Asphalt Paving Technol* 67:1-41.
- [81] D. Lee, 1973. Asphalt durability correlation in Iowa. *Highway Res Board* 468:43-60.
- [82] A. Verhasselt, 2002. Long Term ageing - Simulation by RCAT ageing tests, ISAP.
- [83] A. Verhasselt, 2004. Short- and Long Term ageing with RCAT on bituminous Mastics, 3rd Euroasphalt & Eurobitume Congress 2:1429-1439.
- [84] B. Hayton, R. Elliott, G. Airey y C. Raynor, 1999. Long term ageing of bituminous binders, *Proc Eurobitume Workshop* 99, 126.
- [85] H. Von Quintus, J. Scherocman, T. Kennedy y C. Hughes, 1988. Asphalt Aggregate mixture analysis system, NCHRP.
- [86] C. Bell, Y. AbWahab, M. Cristi y D. Sosovske, 1994. SHRP-A-383: Selection of Laboratory Aging Procedures for Asphalt-Aggregate Mixtures.
- [87] AASHTO R30, 1994. Standard practice for mixture conditioning of hot mix asphalt.
- [88] T. Scholz, 1995. Durability of bituminous paving mixtures, Tesis doctoral, Universidad de Nottingham.
- [89] H. Plancher, E.L. Green y J.C. Peterson, 1976. Reduction of oxidative hardening of asphalts by treatment with hydrated lime - a mechanistic study, *Proc Assoc Asphalt Paving Technol* 45:1-24.
- [90] N. Piérald y A. Vaneltraete, 2009. Developing a test method for the accelerated ageing of bituminous mixtures in the laboratory, en *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*, P.S. & A. Loizos, ed. Taylor & Francis Group, 163-171.
- [91] F. Hugo y T. Kennedy, 1985. Surface cracking of asphalt mixtures in Southern Africa, *Proc Assoc Asphalt Paving Technol* 54:454-501.
- [92] A. Kumar y W. Goetz, 1977. Asphalt hardening as affected by film thickness, voids and permeability in asphaltic mixtures, *Proc Assoc Asphalt Paving Technol* 46:571-605.
- [93] H. Khalid y C. Walsh, 2000. Relating mix and binder fundamental properties of aged porous asphalt materials, *Proc 2nd Euroasphalt & Eurobitume Congress, Session 1: Performance Testing and Specifications for Binder and Mixtures*, 398-405.
- [94] H. Korsgaard, J. Blumensen, J. Sundahl y C. Gonzales, 1996. Accelerated ageing of asphalt in pressure ageing vessel, *Proc 1st Euroasphalt & Eurobitume Congress* 1(4.048).

- [95] Y. Hachiya, K. Nomura y J. Shen, 2003. Accelerated Aging Tests for Asphalt Concretes, 6th RILEM Symposium PTEBM.
- [96] C. Such, M. Ballie, B. Lombardi, F. Migliori, G. Ramond, J. Samanos y J.P. Simoncelli, 1997. Susceptibilité au vieillissement des bitumen, Experimentation A08. LCPC. Paris: Bitume, GNB - Groupe National.
- [97] M. Mugler, 1970. Die Veränderung der Bitumeneigenschaften während der Verarbeitung und in Fertigen Belag, Route et traffic, 6.
- [98] G.D. Airey, Y.K. Choi, A.C. Collop, A.J.V. Moore y R.C. Elliot, 2005. Combined laboratory ageing/moisture sensitivity assessment of high modulus base asphalt mixtures, Proc Assoc Asphalt Paving Technol 74:307-346
- [99] C. De la Roche, M. Van de Ven, W. Van den Bergh, T. Gabet, V. Dubois, J. Grenfell y L. Porot, 2009. Development of a laboratory bituminous mixtures ageing protocol, en Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Loizos, Partl, Scarpas, Al-Qadi (Eds), 331-345.
- [100] M. Tia, B.E. Ruth, C.T. Charai, J.M. Shiao, D. Richardson y J. Williams, 1988. Investigation of original and in-service asphalt properties for the development of improved specifications-final phase of testing and analysis, Final Report, Engineering and Industrial Experiment Station (University of Florida, Gainesville, FL).
- [101] G. Van Gooswilligen, F. De Bats y T. Harrison, 1989. Quality of paving grade bitumen - a practical approach in terms of functional tests, Proc. 4th Eurobitume Symp, 290-297.
- [102] C. Boadu, 2005. Evaluation of rut resistance of Superpave fine-graded and coarse-graded mixtures, Tesis doctoral, Universidad de Florida.
- [103] L. Qing y J. Harvey, 2005. Investigation of Conditions for Moisture Damage in Concrete and Appropriate Laboratory Test Methods, Report No UCPRC-RR-2005-15, University of California.
- [104] S. Caro-Spinel y A. Álvarez-Lugo, 2011. Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas empleando propiedades termodinámicas, Rev Fac Ing Univ Antioquia 58:95-104.
- [105] E. Balaguer, J. Elvira y J. Fernández del Campo, 1979. Firmes de carreteras. Tomos I y II, Servicio de Publicaciones E.T.S.I.C.C.P. Madrid.
- [106] P. Ferré, 2005. Las Emulsiones de Betún su Química - Física, Carreteras, revista técnica de AEC, 139:20-33.
- [107] N. Kringos, T. Scarpas, C. Kasbergen y P. Selvadurai, 2008. Modelling of combined physical-mechanical moisture-induced damage in asphalt mixes, Part 1: governing processes and formulations, Int J Pavement Eng 9(2):115-128.
- [108] M. Shanahan, 1991. Adhesion and Wetting: Similarities and Differences, Rubber World 205:28-36.

- [109] R. Moraes, R. Velasquez y H. Bahia, 2011. Measuring the effect of moisture on asphalt-aggregate bond with the bitumen bond strength test, *Transport Res Rec* 2209:70-81.
- [110] R. Moraes, R. Velasquez y H. Bahia, 2011. Selección de materiales para mezclas asfálticas resistentes al daño por humedad utilizando el método de la gota sésil y el bitumen bond strength (BBS), XVI CILA.
- [111] B. Kiggundu y F. Roberts, 1988. Stripping in HMA mixtures: state-of-the-art and critical review of test methods, NCAT Report 88-2.
- [112] A. Viswanathan, 2005. Investigation of Moisture Sensitivity of Hot Mix Asphalt Concrete, Tesis doctoral, Universidad de West Virginia.
- [113] E. Arambula, 2007. Influence of Fundamental Material Properties and Air Void structure on Moisture Damage of Asphalt Mixes, Tesis doctoral, Universidad de Texas.
- [114] Asphalt Institute, 2007. Moisture Sensitivity, Best Practices to Minimize Moisture sensitivity in Asphalt Mixtures, MS-24, First Edition.
- [115] G. Valdés, A. Calabi, E. Sanchez, R. Miró y O. Reyes, 2015. Matriz árido-ligante: factores implicados en la capacidad adhesiva y cohesiva del ligante asfáltico, *RIOC*, 40-49.
- [116] S. Caro, E. Masada, A. Bhasin y D. Little, 2008. Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms, *Int J Pavement Eng* 9(2):81-98.
- [117] E. Hunter y K. Ksaibati, 2002. Evaluation moisture susceptibility of asphalt mixes, Report No MPC-02-138.
- [118] T. Breakah, J. Bausano y R. Williams, 2009. Integration of moisture sensitivity testing with gyratory mix design and mechanistic-empirical pavement design, *J Transport Eng* 135(11):852-857.
- [119] J. Rice, 1958. Relationship of aggregate characteristics to the effect of water on bituminous paving mixtures, ASTM STP No 240.
- [120] K. Stuart, 1990. Moisture damage in asphalt mixtures – a state-of-the-art report, Report FHWA-RD-90-019, VA 22101-2296.
- [121] T. Fwa y B. Ong, 1994. Effect of moisture in aggregates on performance of asphalt mixtures, *Transport Res Rec* 1454:28-35.
- [122] G. Huber, 2005. Tenderness caused by moisture, *Proc Int Workshop moisture-induced damage of asphaltic mixes*, ISBN-13:978-90-816396-1-1.
- [123] M. Taylor y N.P. Khosla, 1983. Stripping of asphalt pavements: state-of-the-art, *Transport Res Rec* 911:150-157.
- [124] P. Kandhal, 1992. Moisture susceptibility of HMA mixes: identification of problem and recommended solutions, NCAT, Report 92-1.
- [125] U. Bagampadde, U. Isacson y B. Kiggundu, 2004. Classical and Contemporary Aspects of Stripping in Bituminous Mixes, *Road Mater Pavement* 5(1):7-43.

- [126] A. Figueroa y F. Reyes, 2012. Influence of water in asphalt binders and its impact on stripping of asphalt mixtures, 5th Euroasphalt & Eurobitume Congress.
- [127] H. Fromm, 1974. The mechanism of asphalt stripping from aggregate surfaces, *Proc Assoc Asphalt Paving* 43:191-223.
- [128] R. Mcgennis, T. Kennedy y R. Machemehl, 1984. Stripping and moisture damage in asphalt mixtures, RHWA/TX-85/55+253-1, Dept. of Highways and Public Transportation, Austin Texas.
- [129] R. Terrel y J. Shute, 1989. Summay report on water sensitivity, SHRP-A/IR-89-003.
- [130] R. Mcgennis, 1995. Background to superpave asphalt mixture design and analysis, Report FHWA-SA-95-003.
- [131] S. Hallberg, 1950. The adhesion of bituminous binders and aggregates in the presence of water, Statens, Vaginstitut, Stockholm, Meddeland, 78.
- [132] P. Kandhal, 1994. Field and lab investigation of stripping in asphalt pavements: state-of-the-art, *Transport Res Rec* 1454:36-47.
- [133] J. Scott, 1978. Adhesion and disbonding mechanisms of asphalt used in highway construction and maintenance, *Proc Assoc Asphalt Paving* 47:19-43.
- [134] Y. Edwards y J. Aurstad, 2000. The influence of runway de-icing agents on durability of asphalt concrete pavements for airfields, *RMPD*, 1(4).
- [135] J. Petersen y H. Plancher, 1998. Model studies and interpretive review of the competitive adsorption and water displacement of petroleum asphalt chemical functionalities on mineral aggregate surfaces, *Petro Sc and Tech* 89-131.
- [136] L. Brown, G. Pabst y J. Marcev, 1990. The contribution of microorganisms to stripping and the ability of an organo functional silane to prevent stripping, *Proc Assoc Asphalt Paving* 59:360-378
- [137] F. Parker y L. Benefield, 1991. Effects of microbial activity in asphalt-aggregate bond, *Proc Assoc Asphalt Paving* 60:188-206.
- [138] E. Thunqvist, 2001. Long term effects of deicing salt on the roadside environment part II: groundwater and surface water, *Proc 9th maintenance management conference*.
- [139] A. Mehrara y A. Khodai, 2013. A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete, *Constr Build Mater* 38:423-442.
- [140] N. Kringos, 2007. Modelling of combined physical-mechanical moisture-induced damage in asphaltic mixes, Tesis doctoral, TU Delft, ISBN 9789090217659.
- [141] E. Arambula, E. Masad y A. Epps, 2007. The influence of crack growth distribution on the moisture susceptibility of asphalt mixes, *J Mater Civil Eng* 19 (8):655–664.
- [142] A. Dawson, N. Kringos, T. Scarpas y P. Pavsic, 2008. Water in the Pavement Surfacing, en: *Water in road Structures*, Dawson, ed., Springer, 81-105.

- [143] R.L. Terrel y S. Al-Swailmi, 1994. Water Sensitivity of Asphalt-Aggregate Mixes: Test Selection, SHRP, Report A-403.
- [144] M. Ford, P. Manke y C. O'Bannon, 1974. Quantitative evaluation of stripping by the Surface Reaction Test, *Transport Res Rec* 515:40-54.
- [145] A. Dony y C. Turmel, 1993. Bitumes-polymères: adaptons nos tests aux techniques d'aujourd'hui, 5th Eurobitume Congress IA:66-70.
- [146] A. Tarrer y V. Wagh, 1991. The Effect of the Physical and Chemical Characteristics of the Aggregate on Bonding, SHRP.
- [147] M.O. Hamzah, M.R. Kakar y M.R. Hainin, 2015. An Overview of Moisture Damage in Asphalt Mixtures, *J Teknologi* 73(4):125-131.
- [148] D.N. Little y D.R. Jones, 2003. Chemical and mechanical processes of moisture damage in hot-mix asphalt pavements, *Proc Moisture Sensitivity Asphalt Pavements – A National Seminar*.
- [149] G.M. García, 2012. Análisis comparativo del comportamiento mecánico de mezclas bituminosas. Normativa NLT- Normativa UNE-EN, Tesis doctoral, Universidad de Granada.
- [150] D. Cheng, D. Little, R. Lytton y J. Holste, 2002. Use of surface free energy properties of the asphalt-aggregate system to predict damage potential, *Proc Assoc Asphalt Paving* 71:59-88.
- [151] D. Cheng, D. Little, R. Lytton y J. Holste, 2003. Moisture damage evaluation of asphalt mixtures by considering both moisture diffusion and repeated - load conditions, *Transport Res Rec* 1832.
- [152] E. Masad, A. Al-Omari y R. Lytton, 2006. Simple method for predicting laboratory and field permeability of hot-mix asphalt, *Transport Res Rec* 1970:55-63.
- [153] A. Mehrara y A. Khodaii, 2011. Evaluation of asphalt mixtures moisture sensitivity by dynamic creep test, *J Mater Civil Eng* 23(2):212-219.
- [154] R. Miró, 1994. Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [155] M. Shamshuddin, M. Abdullah y S. Rhasbudin Shah, 2010. The Development of Moisture Sensitivity Test for Compacted Asphalt, *Int J Integrated Eng* 2(2):17-25.
- [156] S. Abo-Qudais, 2007. The effects of damage evaluation techniques on the prediction of environmental damage in asphalt mixtures, *Build Environ* 42(1):288-296.
- [157] H. Rondón-Quintana y L. Moreno-Anselmi, 2010. Influencia del agua en el fenómeno de stripping en mezclas asfálticas: estudio sobre el ligante, *Ing Univ Bogotá* 14(2):297-312.
- [158] J. Scherocman, K. Mesch y J. Proctor, 1986. The effect of multiple freeze thaw cycle conditioning on the moisture damage in asphalt concrete mixture, *Proc Assoc Asphalt Paving* 55:213-227

- [159] A. Bhasin, 2006. Development of methods to quantify bitumen-aggregate adhesion and loss of adhesion due to water, Tesis doctoral, Texas A&M University.
- [160] R.C. Williams y T.M. Breakah, 2010. Evaluation of Hot Mix Asphalt Moisture Sensitivity Using the Nottingham Asphalt Test Equipment, Final report, Iowa State University.
- [161] T. Kennedy, 1982. Laboratory tests for water susceptibility. Proceedings of the Annual Meeting of Texas Hot mix Asphalt Pavement Association, Report No FHWA-DP 39-36:160-189.
- [162] J. Chen, S. Young, S. y K. Lin, 2004. Effects of crack width and permeability on moisture-induced damage of pavements, *J Mater Civil Eng* 16(3):276-282.
- [163] K. Sunghwan y B. Coree, 2005. Evaluation of hot mix asphalt moisture sensitivity using the Nottingham Asphalt Test Equipment, Center for transportation, research and education, Iowa State University.
- [164] B. Shah, 2003. Evaluation of moisture damage within asphalt concrete mixes, Tesis doctoral, Texas A&M University.
- [165] C. Curtis, K. Ensley y J. Epps, 1993. Fundamental properties of asphalt-aggregate interactions including adhesion and adsorption, SHRP-A-341.
- [166] M. Solaimanian, T. Kennedy y W. Elmore, 1993. Long term evaluation of stripping and moisture damage in asphalt pavements treated with lime and anti-stripping agents. Report no CTR 0-1286-1F, Texas Department of Transportation, Center of Transportation Research, University of Texas at Austin.
- [167] A.R. Copeland, 2007. Influence of moisture on bond strength of asphalt-aggregate systems, Tesis doctoral, Universidad de Vanderbilt.
- [168] K. Majidzadeh y F.N. Brovold, 1968. State of the art: effect of water on bitumen-aggregate mixtures, Highway Res Board Special Report 98.
- [169] R. Lottman y D. Johnson, 1971. The moisture mechanism that causes asphalt stripping in asphaltic pavement mixtures, Engineering Experimental Station, University of Idaho.
- [170] P. Kandhal, J.C.W. Lubold y F. Roberts, 1989. Water damage to asphalt overlays: case histories, NCAT Report No 89-1, Assoc Asphalt Paving Technol.
- [171] E. Mohamed, 1993. Debonding location in asphalt concrete associated with moisture damage, *J Mater Civil Eng* 5(4):497-509.
- [172] S. Amirkhanian y B. Williams, 1993. Recyclability of moisture damaged flexible pavements, *J Mater Civil Eng* 5(4):510-530.
- [173] T. Williams y F. Mikinis, 1998. Use of environmental SEM to study asphalt-water interactions, *J Mater Civil Eng* 10(2):121-124.
- [174] U. Bagampadde, U. Isacson y B. Kiggundu, 2005. Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures, *Int J Pavement Eng*

- 6(4):229-239.
- [175] R. Mallick, R. Pelland y F. Hugo, 2005. Use of accelerated loading equipment for determination of long term moisture susceptibility of hot mix asphalt, *Int J Pavement Eng* 6(2):125-136.
- [176] N. Kringos, A. Scarpas, A. Copeland y J. Youtcheff, 2008. Modelling of combined physical-mechanical moisture-induced damage in asphaltic mixes, Part 2: moisture susceptibility parameters, *Int J Pavement Eng* 9(2):129-151.
- [177] M.J. Khattak y V. Kyatham, 2008. Mechanistic characteristics of moisture damaged asphalt matrix and hot mix asphalt mixtures, *Airfield and Highway Pavements*.
- [178] E. Kassem, E. Masada, R. Lytton y R. Bulut, 2009. Measurements of the moisture diffusion coefficient of asphalt mixtures and its relationship to mixture composition, *Int J Pavement Eng* 10(6):389-399.
- [179] FHWA, 2003. Distress Identification Manual for Long-Term Pavement Performance Program, Publication No FHWA-RD-03-031.
- [180] R. Lytton, 2002. Mechanics and measurement of moisture damage, *Proceedings of moisture damage symposium, WRI, Wyoming*.
- [181] G. Airey y Y. Choi, 2002. State of the Art Report on Moisture Sensitivity Test Methods for Bituminous Pavement Materials, *Road Mater Pavement* 3(4):355-372.
- [182] ASTM D1664-80, 1985. Standard Test Method for Effect of water on compressive strength of compacted bituminous mixtures.
- [183] AASTHO T182. Standard method of test for coating and stripping of bitumen-aggregate mixtures.
- [184] C. Whiteoak, 1990. *Shell Bitumen Handbook*.
- [185] UNE-EN 12697-11:2012. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 11: determinación de la afinidad entre áridos y betún.
- [186] Norma NLT-166/92. Adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos en presencia de agua. CEDEX.
- [187] State of California Department of Transportation, 2002. California Test 302. Method of test for moisture vapor susceptibility of bituminous mixtures.
- [188] M. Solaimanian, J. Harvey, M. Tahmoressi y V. Tandon, 2003. Test method to predict moisture sensitivity of hot mix asphalt pavements, *Moisture sensitivity of asphalt pavements: a national seminar*.
- [189] ASTM D3625-96, 2005. Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate using Boiling Water
- [190] NLT-355/93. Adhesividad de los ligantes bituminosos a los áridos finos (procedimiento Riedel-Weber).

- [191] E. Harrigan, R. Leathy y J. Youtcheff, 1994. SHRP-A-379. The Superpave mix design system: manual of specifications, test methods and practices, National Research Council.
- [192] G. Walsh, I. Jamieson, J. Thorton y M. O'Mahony, 1996. A modified SHRP net adsorption test, Proc 1st Euroasphalt & Eurobitume Congress, 4.069.
- [193] M. Bocci y S. Colagrande, 1993. The adhesiveness of modified road bitumens, Proceedings of the 5th Eurobitume Congress 1A, 1.61.
- [194] S. Caro, E. Masadm, A. Bhasin y D.N. Little, 2008. Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 2: Characterisation and modelling, Int J Pavement Eng 9(2):99-114.
- [195] Vuorinen, M.J. y J.P. Valtonen, 1999. A new ultrasound method for measuring the resistance to stripping, Proc Eurobitume Workshop 99, 023.
- [196] Kennedy, T.W., F.L. Roberts y K.W. Lee, 1982. Evaluation of moisture susceptibility of asphalt mixtures using the Texas freeze-thaw pedestal test, Proc Assoc Asphalt Paving Technol 51:327-341.
- [197] AASHTO T165, 2002. Standard method of test for effect of water on compressive strength of compacted bituminous mixtures.
- [198] ASTM D1075, 2005. Standard Test Method for Effect of Water on Compressive Strength of Compacted Bituminous Mixtures.
- [199] AASHTO T245, 2015. Standard method of test for resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall Apparatus.
- [200] NFP 98-251-1, 2002. Essais relatifs chaussées – Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés – Partie 1 : essai DURIEZ sur mélanges hydrocarbonés à chaud.
- [201] J.F. Corte y J.P. Serfass, 2000. The French approach to asphalt mixture design: a performance-related system of specifications, Proc Assoc Asphalt Paving Technol 69:794-834.
- [202] R.P. Lottman, 1982. Laboratory test method for Predicting moisture-induced damage to asphalt concrete, NCHRP Report 246, Transport Res Rec 843:88-95.
- [203] D.G. Tunncliff y R.E. Root, 1984. Antistripping Additives in Asphalt Concrete Mixtures, NCHRP Synthesis of Highway Practice, 274.
- [204] ASTM D4867, 2014. Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures.
- [205] AASHTO T283, 2007. Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to moisture-induced damage.
- [206] IDOT (2013). Hot Mix Asphalt, Level I Technician Course, Bur Mater Phys Res, 79-90.
- [207] State of California Department of Transportation, 2000. California Test 366. Method of Test for Stabilometer Value.
- [208] State of California Department of Transportation, 2000. California Test 307. Method of Test for Film Stripping.

- [209] UNE-EN 12697-12, 2009. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa.
- [210] L. Poulikakos y M. Partl, 2009. Evaluation of moisture susceptibility of porous asphalt concrete using water submersion fatigue tests, *Constr Build Mater* 23(12):3475-3484.
- [211] G. Airey, A. Collop, S. Zoorob y R. Elliott, 2008. The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage, *Constr Build Mater* 22(9):2015-2024.
- [212] J. Grenfell, N. Ahmad, G. Airey, A. Collop y R. Elliott, 2012. Optimising the moisture durability SATS conditioning parameters for universal asphalt mixture application, *Int J Pavement Eng* 13(5):433-450.
- [213] J. Howson, E.A. Masad, A. Bhasin, V. Castelo, E. Arambula, R. Lytton y D. Little, 2007. System for the evaluation of moisture damage using fundamental material properties, Technical Report No 0-4524-1.
- [214] S. Jahromi, 2009. Estimation of resistance to moisture destruction in asphalt mixtures, *Constr Build Mater* 23(6):2324-2331.
- [215] FHWA, 2003. Distress identification manual for the long-term pavement performance program. FHWA-RD-03-031.
- [216] G. Colombier, 1997. Cracking in pavements: nature and origin of cracks, en prevention of reflective cracking in pavements, RILEM Report 18, Vanelstraete y Francken eds., 1-15.
- [217] R. Roque, B. Birgisson, Z. Zhang, B. Sangpetngam y T. Grant, 2002. Implementation of SHRP Indirect Tension Tester to Mitigate Cracking in Asphalt Pavement and Overlays, Final Report, Florida Department of Transportation.
- [218] C. Koh, G. Lopp y R. Roque, 2009. Development of a dog-bone direct tension test (DBDT) for asphalt concrete, en *Advanced Testing and Characterization of bituminous materials* 1:585-596.
- [219] C. Fonseca, 1995. Estudio de capas antifisuras para retardar el inicio y propagación de grietas en pavimentos flexibles y semirígidos, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [220] K. Majidzadeh, E.M. Kauffman y D.V. Rassamooj, 1971. Application of fracture Mechanics in the Analysis of Pavement Fatigue, *Proc Assoc Asphalt Paving Technol* 40:227-246.
- [221] J.G. Irwin, 1957. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate, *J Appl Mech* 24:361-364.
- [222] M. Fakhri, M. Farokhi y P. Kheiry, 2009. Modeling of Top-Down Cracking (TDC) propagation in asphalt concrete pavements using fracture mechanics theory, en *Advanced testing and characterization of bituminous materials* 2:681-692.

- [223] D. Laveissiere, 2002. Modelisation de la remontée de fissure en fatigue dans les structures routieres par endommagement et macro-fissuration. De l'experimentation a l'outil de dimensionnement pour l'estimation de la duree de vie, Tesis doctoral, Universidad de Limoges.
- [224] S. Erlingsson, 2000. Stiffness and fatigue of asphalt concrete estimated with the indirect tensile test, Eng Res Inst.
- [225] F.A. Gutiérrez, 2006. Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras. Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles.
- [226] H. Rababaah, D. Vrajitoru y J. Wolfer, 2005. Asphalt pavement crack classification: a comparison of GA, MLP and SOM, Proc Genetic and Evolutionary Computation Conference.
- [227] E.V. Dave y W.G. Buttlar, 2010. Thermal reflective cracking of asphalt concrete overlays, Int J Pavement Eng 11(6):477-488.
- [228] R.L. Lytton, 1989. Use of geotextiles for the reinforcement and strain relief in asphalt concrete, Geotex Geomembr 8:217-237.
- [229] H.J. Park y Y.R. Kim, 2013. Investigation into Top-Down Cracking of Asphalt Pavements in North Carolina, Transport Res Rec 2368:45-55.
- [230] Y. Zhao, M. Alae y G. Fu, 2017. Investigation of mechanisms of top-down fatigue cracking of asphalt pavement, Road Mater Pavement, 1-12.
- [231] J.S. Uhlmeyer, K. Willoughby, L.M. Pierde y J.P. Mahoney, 2000. Top down cracking in Washington state asphalt concrete wearing course, Transport Res Rec 1730.
- [232] K. Nesnas y M. Nunn, 2004. A model for top-down reflection cracking in composite pavements, Proc 5th Int RILEM Conf Reflective Cracking in Pavements, 409-416.
- [233] J.J. Emery, 2007. Mitigation of asphalt pavement top-down cracking, 4th Int SIIV Congress, Palermo.
- [234] M.W. Witczak y M.M. El-Basyouny, 2004. Calibration of fatigue cracking models for flexible pavements, Guide for mechanistic-empirical design, NCHRP.
- [235] E. Freitas, P. Pereira y L. Picado-Santos, 2003. Assessment of Top-Down Cracking Causes in Asphalt Pavements, Mairepav3, Guimarães, Portugal.
- [236] P.S. Pell, 1962. Fatigue of asphalt pavement mixes, ISAP 2nd Conference.
- [237] W. Van Dijk, H. Moreaud, A. Quedeville y P. Uge, 1972. The fatigue of bitumen and bituminous mixes, ISAP 3rd Conference, 354-366.
- [238] SHRP A-404, 1994. Fatigue response of asphalt-aggregate mixes, Asphalt Research Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.
- [239] M.A. Miner, 1945. Cumulative damage in fatigue, J Appl Mech 12(9):159-164.
- [240] R.A. Schapery, 1984. Correspondence principles and a generalized J integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media, Int J Fract 25(3):195-223.

- [241] Y. Kim, N. Kim y N. Khosla, 1992. Effects of aggregate type and gradation on fatigue and permanent deformation of asphalt concrete, Effects of aggregates and mineral fillers on asphalt mixture performance, ASTM, 310-327.
- [242] K.A. Ghuzlan, 2001. Fatigue damage analysis in asphalt concrete mixtures based upon dissipated energy concepts, Tesis doctoral, Universidad de Illinois, Urbana-Champaign.
- [243] S.H. Carpenter y M. Jansen, 1997. Fatigue behavior under new aircraft loading conditions, en Aircraft/pavement technol, ASCE, 259-271.
- [244] Z.P. Bazant y J. Planas, 1998. Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials, CRC Press.
- [245] G.R. Irwin, 1948. Fracture dynamics, Fracturing of Metals, Am Soc Met, 147-166.
- [246] E. Orowan, 1955. Energy criterion of fracture, Weld J Res Suppl 157-160.
- [247] S. Oller, 2001. Fractura Mecánica. Un enfoque global, Centro Internacional de Métodos Numéricos, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [248] S. Shah, S. Shwartz y C. Ouyang, 1995. Fracture mechanics of concrete, Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock and other Quasi-Brittle Materials, Wiley-Interscience Publication.
- [249] B. Karihaloo, 1995. Fracture Mechanics and Structural Concrete, Longman Scientific and Technical Publishers, Wiley.
- [250] G.A. Valdés, 2011. Evaluación del proceso de fisuración en las mezclas bituminosas mediante el desarrollo de un nuevo ensayo experimental -Ensayo Fénix-, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [251] C.N. Chiangmai, 2010. Fatigue-fracture relation on asphalt concrete mixtures, Tesis doctoral, Universidad de Illinois, Urbana-Champaign.
- [252] F. Safaei, C. Castorena y Y.R. Kim, 2016. Linking asphalt binder fatigue to asphalt mixture fatigue performance using viscoelastic continuum damage modeling, Mech Time-Depend Mater 20(3):299-323.
- [253] UNE-EN 12697-24:2013. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 24: resistencia a la fatiga.
- [254] F.E. Pérez-Jiménez, G. Valdés, R. Miró, R. Botella y J.M. Campana, 2011. Effect of thermal stresses on fatigue behavior of bituminous mixes, Transport Res Rec 2210:90-6.
- [255] F.E. Pérez Jiménez, R. Miró y J. Cepeda, 2000. Estudio del comportamiento a fatiga de mezclas bituminosas mediante el ensayo BTM de tracción directa, Departamento de Infraestructuras del Transporte y del Territorio, UPC, España.
- [256] A. Whöhler, 1860. Versuche über die Festigkeit der Eisenbahnachsen, Zeitschrift für Bauwesen 10:583-591.
- [257] P.S. Pell, P.F. McCarthy y R.R. Gardner, 1961. Fatigue of bitumen and bituminous mixes, Int J Mech Sci 3:247-248.

- [258] W. Schütz, 1996. A history of fatigue, *Eng Fract Mech* 54(2):263-300.
- [259] M. Mamlouk y B. Mobasher, 2004. Cracking Resistance of Asphalt Rubber Mix versus Hot-Mix Asphalt, *Road Mater Pavement* 5:435-452.
- [260] M. Wagoner, W. Buttlar, G. Paulino y P. Blankenship, 2005. Investigation of the fracture resistance of hot-mix asphalt concrete using a disk-shaped compact tension test, *Transport Res Rec* 1929:183-192.
- [261] O. Portillo y D. Cobon, 2008. Fracture of bitumen and bituminous mixes, Oatley Seminar, Cambridge University Engineering Department.
- [262] M. Wagoner, W. Buttlar y G. Paulino, 2005. Disk-shaped compact tension test for asphalt concrete fracture, *Exp Mech* 45(3):270-277.
- [263] ASTM D7313-07. Standard test method for determining fracture energy of asphalt-aggregate mixtures using the disk-shaped compact tension geometry.
- [264] X. Li, 2005. Investigation of the fracture resistance of asphalt mixtures at low temperatures with a semi-circular bend (SCB) test, Tesis doctoral, Universidad de Minnesota.
- [265] F. Pérez-Jiménez, R. Miró y C. Fonseca, 1997. Essai BDT pour la détermination de la ténacité et résistance au fissurage des mélanges bitumineux, 4th RILEM Essais mécaniques pour les matériaux bitumineux, 391-396.
- [266] F. Pérez, R. Miró, A. Martínez y E. Garrote, 2007. Nuevo procedimiento de ensayo para evaluar la tenacidad de las mezclas bituminosas, *Rev Carreteras* 153.
- [267] O. Abdulshafi, 1983. Rational material characterization of asphaltic concrete pavements, Tesis doctoral, Universidad de Ohio.
- [268] F.E. Pérez-Jiménez, G.A. Valdés, R. Miró, A.H. Martínez y R. Botella, 2010. Fénix: Test Development of a new test procedure for evaluating cracking resistance in bituminous mixtures, *Transport Res Rec* 3(2181):36-43.
- [269] S.V. González y S.E. Velandia, 2006. Estado del arte en el estudio de la fatiga de materiales bituminosos, Universidad Industrial de Santander.
- [270] F. Pérez, R. Miró, A. Martínez, J. Alonso, J. Cepeda y M. Rodríguez, 2005. Desarrollo de un nuevo procedimiento para la evaluación del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas a partir de su caracterización en un ensayo de tracción, Primer premio internacional a la innovación en carreteras Juan Antonio Fernández del Campo, España.
- [271] J. Alonso, 2006. Estudio del proceso de deformación y agrietamiento por fatiga de mezclas bituminosas sometidas a carga cíclica, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [272] P. Paris y F. Erodgan, 1963. A critical analysis of crack propagation laws, *J Basic Eng* 85(4):528-533.

- [273] H. Baaj, H. Di Benedetto y P. Chaverot, 2005. Effect of binder characteristics on fatigue of asphalt pavement using an intrinsic damage approach, *Road Mater Pavement* 6(2):147-174.
- [274] S. Shen y S.H. Carpenter, 2007. Development of an asphalt fatigue model based on energy principles, *Proc Assoc Asphalt Paving Technol*, 525-574.
- [275] M.R. Thompson y F. Hugo, 1987. Design methods, ISAP 6th Conference 2.
- [276] L.E. Santucci y R.J. Schmidt, 1969. The effect of asphalt properties on the fatigue resistance of asphalt paving mixtures, *J Assoc Asphalt Pav* 38:65-97.
- [277] X. Li, A. Braham, M. Marasteanu, W. Buttler y R. Williams, 2008. Effect of factors affecting fracture energy of asphalt concrete at low temperature, *Road Mater Pavement* 9(sup1):397-416.
- [278] R. Velásquez, M. Turos, M. Marasteanu, N. Gibson y T. Clyne, 2008. Investigation of low temperature cracking in asphalt mixtures using TSRST, *Pavement cracking: mechanisms, modeling, detection, testing and case histories*, 405-414.
- [279] J.A. Epps y C.L. Monismith, 1969. Influence of mixture variables on the flexural fatigue properties of asphalt concrete, *J Assoc Asphalt Pav* 38:422-464.
- [280] J. Harvey y B. Tsai, 1996. Effects of asphalt cement content and air void content on mix fatigue and stiffness, *Transport Res Rec* 1543:38-45.
- [281] P.S. Pell, 1967. Fatigue of asphalt pavement mixes, *Proc 2nd Conf Struct Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, 577-593.
- [282] J. Myre, 1990. Fatigue of asphalt pavements, *3rd Int Conf Bearing Capacity of Roads and Airfields*, Norway, 703-714.
- [283] A. Jajliardo, 2003. Development of specification criteria to mitigate top-down cracking, *Master Thesis of Engineering*, Universidad de Florida.
- [284] R.A. Jiménez y B.M. Gallaway, 1962. Behavior of asphaltic concrete diaphragms to repetitive loadings, *Int Conf Structural Design of Asphalt Pavements*.
- [285] C.L. Monismith y J.A. Deacon, 1969. Fatigue of asphalt paving mixtures, *J Transport Eng* 95(2):317-345.
- [286] G. Malan, P. Straus y F. Hugo, 1989. A field study of premature surface cracking in asphalt, *Proc Assoc Asphalt Paving Technol* 58:142-162.
- [287] C.R. Freeme y C.P. Marais, 1973. Thin bituminous surfaces: their fatigue behavior and prediction, *Highway Research Board*, Special Report No. 140, 158-179.
- [288] J.A. Epps y C.L. Monismith, 1971. Fatigue of asphalt concrete mixtures-Summary of existing information, en *Fatigue of Compacted bituminous aggregate mixtures*, ASTM, 19-45.
- [289] P.S. Pell y K.E. Cooper, 1975. The fatigue of testing and mix variables on the fatigue performance of bituminous materials, *J Assoc Asphalt Pav* 44:1-37.

- [290] T.H. Doan, 1997. Les études de fatiga des enrobes bitumineux au LCPC, Bitumen et enrobes bitumineux, Bull Liaison labo P et Ch.
- [291] A. Braham, W. Buttlar y M. Marasteanu, 2007. Effect of binder type, aggregate and mixture composition in the fracture energy of hot mix asphalt in cold climates, Transport Res Rec 2001:102-109.
- [292] P. Kandhal y F. Parker, 1998. The aggregates' role in HMA performance, aggregate tests related to asphalt concrete performance in pavements, NCHRP 405.
- [293] S.F. Brown, 1978. Material characterization for analytical pavement design, Developments in highway pavement engineering I, P.S. Pell, ed. Applied Science Publisher, 41-92.
- [294] R.G. Hicks, F.N. Finn, C.L. Monismith y R.B. Leahy, 1963. Validation of SHRP binder specification through mix testing, Proc Assoc Asphalt Paving Technol 62:565-614.
- [295] B.J. Smith y S. Hesp, 2000. Crack pinning in asphalt mastic and concrete: regular fatigue studies, Transport Res Rec 1728:75-81.
- [296] D.A. Williams, 1998. Microdamage healing in asphalt concretes: relating binder composition and surface energy to healing rate, Tesis doctoral, Universidad de Texas.
- [297] J.M. Mathews y C.L. Monismith, 1993. Investigation of laboratory fatigue testing procedures for asphalt aggregate mixtures, J Transport Eng 119(4):634-654.
- [298] J. García, 1992. Procedimientos de estudio en laboratorio, Jornadas de reflexión de Grietas en carreteras, CEDEX.
- [299] A.M. Hartman y M.D. Gilchrist, 2004. Evaluating four point bend fatigue of asphalt mixture using image analysis, J. Mater Civil Eng, 60-68.
- [300] K.E. Cooper y S.F. Brown, 1989. Development of a simple apparatus for the measurement of the mechanical properties of asphalt mixes, Pro Eurobitume Sym, 494-498.
- [301] F. Moreno, 2013. Diseño de un método de ensayo de laboratorio para el análisis de la resistencia a fisuración de mezclas bituminosas, Tesis doctoral, Universidad de Granada.
- [302] D.A. Anderson, Y. Le Hir, M.O. Marasteanu, J. Planche y D. Martin, 2001. Evaluation of fatigue criteria for asphalt binders, Transport Res Rec 1766:48-56.
- [303] G.M. Rowe, 1993. Performance of Asphalt mixtures in the Trapezoidal Fatigue Test, Proc Assoc Asphalt Paving Technol 62:344-384.
- [304] G.M. Rowe y M.G. Boulding, 2000. Improve techniques to evaluate the fatigue resistance of asphaltic mixtures, Proc 2nd Euroasphalt & Eurobitume Congress.
- [305] J. Crucho, L. Picado-Santos, J. Neves, S. Capitão e I. Al-Qadi, Técnico Accelerated aGEing (TEAGE) – new approach to asphalt concrete ageing laboratory simulation, Submitted to Int. J. Pavement Eng.

- [306] T. López-Montero y R. Miró, 2016. Differences in cracking resistance of asphalt mixtures due to ageing and moisture damage, *Constr Build Mater* 112:299-306.
- [307] T. López-Montero y R. Miró, 2017. Ageing and temperature effect on the fatigue performance of bituminous mixtures, *Mater Constr* 67(327):1-11.
- [308] T. López-Montero, R. Miró, R. Botella y F.E. Pérez-Jiménez, 2017. Obtaining the fatigue laws of bituminous mixtures from a strain sweep test: effect of temperature and aging, *Int J Fatigue* 100:195-205.
- [309] C. Maggiore, 2014. A comparison of different test and analysis methods for asphalt mixtures, Tesis doctoral, Universidad de Nottingham.
- [310] UNE-EN 12697-23, 2004. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 23: Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas.
- [311] M. Cortés, 2014. Durabilidad de mezclas con áridos siderúrgicos, Trabajo fin de máster, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [312] K.A. Ghuzlan y S.H. Carpenter, 2000. Fatigue damage analysis in asphalt concrete mixtures using the dissipated energy approach, *Can J Civ Eng* 33:890-901.
- [313] S.H. Carpenter, K.A. Ghuzlan y S. Shen, 2003. A fatigue endurance limit for highway and airport pavements, *Transport Res Rec* 1832:131-138.
- [314] T. López-Montero, R. Miró, F. Pérez-Jiménez y R. Botella, 2016. Efecto del contenido de betún en la fatiga de las mezclas asfálticas mediante la aplicación del ensayo EBADE, XI Jornada Nacional de Asefma.
- [315] F. Pérez-Jiménez, R. Botella, A.H. Martínez y R. Miró, 2013. Analysis of the mechanical behaviour of bituminous mixtures at low temperatures, *Construct Build Mater* 46:193-202.
- [316] M. Abojaradeh, 2013. Development of Fatigue Failure Criterion for Hot-Mix Asphalt Based on Dissipated Energy and Stiffness Ratio, *Jordan J Civil Eng* 7(1):54-69.
- [317] R. Botella, F.E. Pérez-Jiménez, E. Riahi, T. López-Montero, R. Miró y A.H. Martínez, 2017. Self-heating and other reversible phenomena in cyclic testing of bituminous materials, *Constr Build Mater* 156:809-818.

Anexos

Anexo 1. Producción científica y actividades

En esta sección se enumeran las publicaciones derivadas de esta tesis doctoral, así como las actividades realizadas durante este periodo de investigación:

Artículos

López-Montero, T. y R. Miró, 2016. Differences in cracking resistance of asphalt mixtures due to ageing and moisture damage. *Construction and Building Materials*, 112, pp. 299-306.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.199>

Índice de impacto: 3,169

López-Montero, T. y R. Miró, 2017. Ageing and temperature effect on the fatigue performance of bituminous mixtures. *Materiales de Construcción*, 67(327), pp. 1-11.

<http://dx.doi.org/10.3989/mc.2017.04216>

Índice de impacto: 1,343 (año 2016)

Pérez-Jiménez, F.E., R. Botella, **T. López-Montero**, R. Miró y A.H. Martínez, 2017. Complexity of the behavior of asphalt materials in cyclic testing. *International Journal of Fatigue*, 98, pp. 111-120.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.01.026>

Índice de impacto: 2,899 (año 2016)

López-Montero, T., R. Miró, R. Botella y F.E. Pérez-Jiménez, 2017. Obtaining the fatigue laws of bituminous mixtures from a strain sweep test: effect of temperature and aging. *International Journal of Fatigue*, 100, Part 1, pp. 195-205.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.03.036>

Índice de impacto: 2,899 (año 2016)

Botella, R., F.E. Pérez-Jiménez, E. Riahi, **T. López-Montero**, R. Miró y A.H. Martínez, 2017. Self-heating and other reversible phenomena in cyclic testing of bituminous materials. *Construction and Building Materials*, 156, pp. 809-818.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.036>

Índice de impacto: 3,169 (año 2016)

López-Montero, T., J. Crucho, L. Picado-Santos y R. Miró, 2018. Effect of nanomaterials on ageing and moisture damage using the indirect tensile strength test. *Construction and Building Materials*, 168, pp. 31-40.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.110>

Índice de impacto: 3,169 (año 2016)

Libros

López-Montero, T. y R. Miró, 2017. El envejecimiento en mezclas asfálticas. Cuaderno tecnológico. Plataforma Tecnológica de la Carretera. ISBN: 978-84-617-9652-6.

López-Montero, T. y R. Miró, 2017. El daño por humedad en las mezclas asfálticas. Cuaderno tecnológico. Plataforma Tecnológica de la Carretera. En proceso de edición.

Comunicaciones

Teresa López-Montero, Rodrigo Miró y Félix Pérez-Jiménez. Efecto del envejecimiento y de la acción del agua en la resistencia a la fisuración bajo cargas monotónicas y por fatiga de las mezclas asfálticas. XVIII Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto (CILA). Bariloche, Argentina. 16-20 noviembre 2015.

Teresa López-Montero, Rodrigo Miró y Félix Pérez-Jiménez. Effect of ageing and water action on the cracking resistance of asphalt mixtures. 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements. Nantes, Francia. 7-9 Junio 2016.

Teresa López-Montero, João Crucho, Rodrigo Miró y Luís Picado-Santos. Influencia de la nanoarcilla en la resistencia al envejecimiento y a la acción del agua de las mezclas asfálticas. XIX Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto (CILA). Medellín, Colombia. Noviembre 2017.

Teresa López-Montero, Ramón Botella, Félix E. Pérez Jiménez, Rodrigo Miró y Adriana H. Martínez. Efecto de los periodos de reposo en los ensayos cíclicos de mezclas bituminosas. VIII Jornadas de ensayos. Asefma. Madrid, España. Febrero 2018.

Estancias en otros centros de investigación

Nottingham Transportation Engineering Centre (University of Nottingham)

Tutor: Gordon Airey

Localidad y país: Nottingham, Reino Unido

Periodo de la estancia: 01/06/2015 - 31/08/2015 (3 meses)

Instituto Superior Técnico (Universidad de Lisboa)

Tutor: Luis Picado Santos

Localidad y país: Lisboa, Portugal

Periodo de la estancia: 01/03/2017 - 30/04/2017 (2 meses)