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 servei TDX (www.tesisenxarxa.net) 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 TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (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 servicio TDR (www.tesisenred.net) 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 TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (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 TDX (www.tesisenxarxa.net) service 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 and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This 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
Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE Y DEL TERRITORIO

Programa de Doctorado
Ingeniería e Infraestructura del Transporte

TESIS DOCTORAL

EL BARRIDO DE DEFORMACIONES COMO MÉTODO PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS

Autor:
RAMÓN BOTELLA NIETO

Director:
DR. FÉLIX EDMUNDO PÉREZ JIMÉNEZ

Barcelona
2013

Agradecimientos

Aprovecho estas líneas para agradecer a todas las personas que a lo largo de este trabajo me han ayudado tanto académica como personalmente.

A mi tutor Félix E. Pérez Jiménez, por darme la oportunidad de realizar este trabajo, por la gran cantidad de conocimientos que me ha transmitido a lo largo de éste y sobretodo por la cercanía y accesibilidad que ha mostrado en todo momento a la hora de resolver dudas.

Al profesor Rodrigo Miró, por su inestimable ayuda con los temas logísticos que han surgido durante la realización de este trabajo y por su ayuda con las correcciones del documento final.

A la profesora Adriana Martínez, por su ayuda con la búsqueda bibliográfica y por sus correcciones de contenido y estilo del manuscrito final.

A José Amorós y Jordi Martín, por su disponibilidad y gran ayuda con los ensayos de laboratorio.

A Oscar Reyes, Gonzalo A. Valdés y Josep Pedret por su amistad y palabras de ánimo en todo momento.

A mis padres, Ramón y Elvira, y a mi hermana María por su apoyo incondicional, sin el cual esta tesis no habría sido posible.

A Núria por estar a mi lado a lo largo de todo el proceso.

Resumen

El comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas es de vital importancia para el diseño de pavimentos. Como componente que cohesiona la mezcla, el ligante hidrocarbonado influye fuertemente en esta propiedad de la mezcla. Por ello es necesario estudiar el comportamiento a fatiga de este material.

Clásicamente las propiedades de los ligantes en condiciones de fatiga han sido estudiadas mediante la obtención de la ley de fatiga del material. Para ello son necesarios numerosos ensayos cíclicos a amplitud de deformación o carga constante, denominados barridos de tiempo. Este tipo de ensayos son largos y costosos.

Esta tesis doctoral presenta un nuevo procedimiento de ensayo que pretende caracterizar el comportamiento a fatiga de ligantes con menor número de ensayos y de menor duración. El nuevo procedimiento se basa en aplicar ensayos cíclicos de amplitud de deformación ascendente. Este tipo de ensayos son conocidos como barridos de deformaciones y por ello, el nuevo procedimientos se nombró EBADE (Ensayo de BArrido de DEformaciones).

Previo a un procedimiento inicial de calibración el EBADE ha sido empleado para caracterizar el comportamiento a fatiga de varios ligantes y se ha demostrado que los resultados obtenidos mediante este ensayo están relacionados con la ley de fatiga del material, cuya obtención implica un consumo de tiempo muy superior.

Así mismo, se ha demostrado que la pérdida de módulo experimentada por el ligante durante los ensayos cíclicos es, en su mayor parte, debida a la tixotropía del material y no a un proceso de daño irreversible.

Como aportación final, se propone el empleo de dos parámetros obtenidos en los ensayos EBADE, el módulo inicial y la deformación de fallo, como parámetros característicos del comportamiento de los ligantes bituminosos a fatiga, en substitución de las leyes de fatiga obtenidas por medio de los ensayos de barrido de tiempo.

Abstract

The fatigue behavior of bituminous mixtures plays a major role in pavement design. The asphalt binder has a strong influence in that property and because of that it is necessary to study its fatigue behavior.

Typically the fatigue properties of binders have been studied by obtaining the fatigue law of the material. This requires several cyclic tests at constant strain or stress amplitude, called time sweep tests. Such tests are long and expensive.

This thesis presents a new test procedure that aims to characterize the fatigue behavior of binders with fewer and shorter tests. The new procedure is based on applying increasing strain amplitude cyclic tests. The test was called EBADE, standing for strain sweep tests in Spanish.

Prior to an initial calibration procedure, the EBADE has been used to characterize the fatigue behavior of several binders and demonstrated that the results obtained by this test are related to the fatigue law of the material, which calculation involves several time consuming tests.

In addition, it has been proven that modulus loss experienced by the binder during cyclic testing is mostly due to the thixotropy of the material and not to a process of irreversible damage.

As a final remark, two parameters obtained in the EBADE tests, initial modulus and failure strain, are proposed to characterize the fatigue behavior of asphalt binders, instead of the fatigue laws obtained by means of the time sweep tests.

Índice general

Índice de figuras **11**

Índice de tablas **17**

1. Introducción y objetivos **19**

2. Estado del arte **23**

2.1. Fatiga 23

2.2. Fatiga en mezclas bituminosas 24

2.2.1. Ensayo de flexión en dos puntos sobre probetas trapezoidales 25

2.2.2. Ensayo de flexión en dos puntos sobre probetas prismáticas 26

2.2.3. Ensayo de flexión en tres puntos sobre probetas prismáticas 27

2.2.4. Ensayo de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas 27

2.2.5. Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas . . 28

2.2.6. Ensayo de fatiga a tracción directa CTD 28

2.2.7. Criterios de fallo 29

2.3. Fatiga en ligantes bituminosos 33

2.4. Viscoelasticidad 37

2.5. Teoria de Daño Viscoelástico Continuo (VECD) 41

2.6. Deformación crítica 49

2.7. Barrido de deformaciones 52

2.8. Tixotropía 54

3. Metodología experimental **57**

3.1. Ensayo EBADE 58

3.2. Ensayo de barrido de deformaciones ascendente 61

3.3. Ensayos de barrido de deformaciones alternativas 67

3.4. Ensayos de barrido de tiempo 68

3.5. Ensayo de envejecimiento acelerado RTFOT 68

3.6. Maquinaria de ensayo 69

3.7. Planificación experimental 69

3.7.1. Ensayos de calibración en ligantes 70

3.7.2. Ensayos de barrido de tiempo en ligantes 72

3.7.3. Ensayos de barrido de deformaciones ascendentes en ligantes 72

3.7.4. Ensayos de barrido de deformaciones alternativas en ligantes 73

3.7.5. Ensayos de barrido de deformaciones alternativas en mezclas 73

4. Resultados **75**

4.1. Ligantes 76

4.1.1. Calibración 76

4.1.2. Barridos de tiempo 89

4.1.3. Barridos de deformación ascendentes 95

4.1.4. Comparativa entre barridos de tiempo y deformaciones . . 98

4.1.5. Barridos de deformaciones alternativas 103

4.2. Mezclas 108

4.2.1. Barridos de deformación alternativas 108

5. Conclusiones **113**

6. Futuras líneas de investigación **117**

7. Referencias **119**

8. Anejos **125**

Índice de figuras

2.1. Esquema de un eje de locomotora fatigado, dibujado por Joseph Glynn en 1843. 23

2.2. Curva de Whöler 24

2.3. Configuraciones de los ensayos de fatiga comúnmente empleados para evaluar mezclas bituminosas [8] 25

2.4. Ensayo de flexión en dos puntos sobre probetas trapezoidales [48] 26

2.5. Ensayo de flexión en dos puntos sobre probetas prismáticas [48] . 26

2.6. Ensayo de flexión en tres puntos sobre probetas prismáticas [48] . 27

2.7. Ensayo de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas [48] 28

2.8. Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas [48] . . . 28

2.9. Ensayo de tracción directa sobre probetas prísmaticas [8] 29

2.10. Definición de las tres fases que tienen lugar en un ensayo de fatiga a deformación constante [24] 30

2.11. Definición de ciclo de fallo, utilizando el criterio de ratio de energía disipada para ensayos a tensión y deformación controlada [8]. R_n: Ratio de energía disipada, DBM strain: Ensayo a deformación controlada, DBM stress: Ensayo a tensión controlada. 32

2.12. Evolución de la deformación unitaria con el número de ciclos de carga aplicados. [8] 32

2.13. Definición de las tres fases que tienen lugar en un ensayo de fatiga a deformación constante. 34

2.14. Ciclo de histéresis obtenido en un ensayo cíclico para un material bituminoso. 35

2.15. Evolución del DER en un ensayo a deformación controlada en el DSR [21]. 36

2.16. Vista esquemática del reómetro anular de corte [49]. 36

2.17. (a) Probeta diábolo después de desmoldar. (b) Probeta diábolo adherida a la máquina de ensayo. (c) Vista esquemática de la probeta sometida a tracción-compresión [17]. 37

2.18. Ejemplo de un ensayo de fluencia 38

2.19. Ejemplo de un ensayo de relajación 38

2.20. Ejemplo del desfase entre la aplicación de carga y la respuesta de un material viscoelástico 42

2.21. Aproximación del trabajo realizado en un ciclo como el área de un triángulo rectángulo 45

2.22. Aproximación del trabajo realizado en un ciclo como el área de una elipse [32] 45

2.23. Evolución de la deformación unitaria con el número de ciclos de carga. Ensayo de fatiga a tracción directa CTD (tensión controlada) [8]. 50

2.24. Evolución de la deformación con los ciclos para un betún B-40/50 y un rango de tensiones entre 2000 y 3750 Pa. [48]. 50

2.25. Rango de deformaciones de la zona de rotura de los betunes estudiados [48]. 51

2.26. Comportamiento del betún B-60/70 al incremento de la amplitud de deformación y periodos de reposo [48]. 51

2.27. Evolución del módulo complejo y la tensión en un ensayo de barrido de deformaciones [55] 52

2.28. Señal de deformación impuesta en el DSR durante el método de ensayo LAS [31] 53

2.29. Varios tipos de respuesta a una reducción instantánea de la amplitud de deformación cíclica (a): b) Material viscoelástico; c) Material tixotrópico inelástico; d) Caso general, [39]. 55

2.30. Respuesta de un material tixotrópico a una historia de amplitud de deformación compleja [39]. 55

3.1. Dimensiones de las probetas cilíndricas empleadas en el ensayo EBADE para ligantes (unidades en milímetros). 59

3.2. Montaje experimental del ensayo EBADE en mezclas, adaptado del ensayo CTD (Cataluña Tracción Directa). 60

3.3. Probeta de betún en su molde antes de ser enrasada. 60

3.4. Probeta de betún adherida a la máquina de ensayo lista para ser ensayada. 60

3.5. Ejemplo de la señal impuesta durante un ensayo EBADE con dos ciclos por escalón de deformación. 62

3.6. Ejemplo de la señal impuesta durante un ensayo EBADE con dos ciclos por escalón de deformación y periodos de reposo entre escalones. 62

3.7. Cálculo aproximado del módulo complejo como la inclinación de la elipse tensión-deformación en un ensayo cíclico. 64

3.8. Ejemplo de gráfica de evolución de la tensión registrada con el número de ciclos en el ensayo EBADE. 65

3.9. Ejemplo de gráfica de evolución del módulo complejo con el número de ciclos en el ensayo EBADE. 65

3.10. Ejemplo de la evolución de las elipses tensión-deformación con el número de ciclos en un ensayo de barrido de tiempo. 66

3.11. Ejemplo de la evolución de las elipses tensión-deformación con la deformación aplicada en un ensayo de barrido de deformaciones. 67

3.12. Ejemplo de la señal impuesta durante un ensayo de barrido de deformaciones alternativas con dos ciclos por escalón de deformación. 68

3.13. Imagen del horno rotatorio con inyección de aire empleado en el ensayo RTFOT. 69

3.14. Prensas dinámicas hidráulicas MTS empleadas en el ensayo. . . . 70

4.1. Representación del módulo complejo en cada ciclo para los seis ensayos considerados. Ensayos realizados a 10ºC y 10 Hz. 78

4.2. Representación de la tensión máxima en cada ciclo para los seis ensayos considerados. Ensayos realizados a 10ºC y 10 Hz. 78

4.3. Representación de la densidad de energía disipada en cada ciclo para los seis ensayos considerados. Ensayos realizados a 10ºC y 10 Hz. 79

4.4. Módulo complejo frente al número de ciclos en el ensayo EBADE a diferentes frecuencias. Ensayos realizados a 10ºC. 81

4.5. Densidad de energía disipada frente al número de ciclos en el ensayo EBADE a diferentes frecuencias. Ensayos realizados a 10ºC. 81

4.6. Evolución de la tensión registrada con el número de ciclos durante el ensayo EBADE para los cuatro ligantes estudiados. 84

4.7. Evolución del módulo complejo con el número de ciclos durante el ensayo EBADE para los cuatro ligantes estudiados. 85

4.8. Evolución de la densidad de energía con el número de ciclos durante el ensayo EBADE para los cuatro ligantes estudiados . . . 85

4.9. Evolución del módulo complejo con el número de ciclos en los ensayos EBADE con diferentes duraciones de escalón de deformación. 87

4.10. Evolución de la tensión con el número de ciclos en los ensayos EBADE con diferentes duraciones de escalón de deformación. . . 87

4.11. Evolución de la densidad de energía disipada con el número de ciclos en los ensayos EBADE con diferentes duraciones de escalón de deformación. 88

4.12. Ensayos de barrido de tiempo a diferentes deformaciones para el ligante B 13/22 a 10ºC y 10 Hz. 91

4.13. Ensayos de barrido de tiempo a diferentes deformaciones para el ligante B 60/70 a 10ºC y 10 Hz. 91

4.14. Ensayos de barrido de tiempo a diferentes deformaciones para el ligante B 40/50 a 10ºC y 10 Hz. 92

4.15. Ensayos de barrido de tiempo a diferentes deformaciones para el ligante B 60/70 RTFOT a 10ºC y 10 Hz. 92

4.16. Primeros 140,000 ciclos de los ensayos de barrido de tiempo a diferentes deformaciones para el ligante B 13/22 a 10ºC y 10 Hz. 93

4.17. Leyes de fatiga obtenidas mediante los ensayos de barrido de tiempo a 10ºC y 10 Hz. 94

4.18. Evolución del módulo complejo en los ensayos de barrido de deformaciones ascendentes a 10ºC y 10 Hz. 97

4.19. Evolución de la densidad de energía disipada en los ensayos de barrido de deformaciones ascendentes a 10ºC y 10 Hz. 98

4.20. Evolución del módulo complejo en los ensayos de barrido de tiempo y deformaciones para el ligante B 13/22 a 10ºC y 10 Hz. . . . 99

4.21. Evolución de la densidad de energía disipada en los ensayos de barrido de tiempo y deformaciones para el ligante B 13/22 a 10ºC y 10 Hz. 99

4.22. Evolución del módulo complejo en los ensayos de barrido de tiempo y deformaciones para el ligante B 60/70 a 10ºC y 10 Hz. . . . 100

4.23. Evolución de la densidad de energía disipada en los ensayos de barrido de tiempo y deformaciones para el ligante B 60/70 a 10ºC y 10 Hz. 100

4.24. Correlación entre el módulo complejo al final de cada escalón en los barridos de deformaciones con el módulo complejo a 5,000 ciclos en los barridos de tiempo 102

4.25. Correlación entre la densidad de energía disipada al final de cada escalón en los barridos de deformaciones con la densidad de energía disipada a 5,000 ciclos en los barridos de tiempo 103

4.26. Evolución del módulo complejo en el primer ensayo de barrido de deformaciones alternativo aplicado al ligante B 40/50 a 10ºC y 10 Hz. 104

4.27. Evolución de la densidad de energía disipada en el primer ensayo de barrido de deformaciones alternativo aplicado al ligante B 40/50 a 10ºC y 10 Hz. 105

4.28. Evolución del módulo complejo en el ensayo barrido de deformaciones alternativo aplicado al ligante B 13/22 a 10ºC y 10 Hz. . . 106

4.29. Evolución del módulo complejo en el ensayo barrido de deformaciones alternativo aplicado al ligante B 60/70 a 10ºC y 10 Hz. . . 106

4.30. Valores del módulo complejo en el escalón inicial, a máxima deformación y en el escalón final de cada triángulo en los ensayos de barrido de deformaciones alternativas en ligantes. 107

4.31. Evolución del módulo complejo en el ensayo barrido de deformaciones alternativo aplicado las mezclas fabricadas con los ligantes B 13/22 y B 60/70 a 20ºC y 10 Hz. 108

4.32. Evolución del módulo complejo en el ensayo barrido de deformaciones alternativo aplicado las mezclas fabricadas con los ligantes B 13/22 y B 60/70 a 20ºC y 10 Hz. Primeros 150,000 ciclos. . . . 109

4.33. Evolución del módulo complejo en el ensayo barrido de deformaciones alternativo aplicado las mezclas fabricadas con los ligantes B 13/22 y B 60/70 a 20ºC y 10 Hz. Parte final de los ensayos. . . 110

4.34. Valores del módulo complejo en el escalón inicial, a máxima deformación y en el escalón final de cada triángulo en los ensayos de barrido de deformaciones alternativas en mezclas. 110

Índice de tablas

3.1. Amplitud de deformación correspondiente a cada escalón de deformación del ensayo EBADE. 63

4.1. Características del ligante B 60/70. 77

4.2. Valores numéricos de los parámetros obtenidos en el ensayo EBADE 80

4.3. Valores numéricos de los parámetros obtenidos en los ensayos EBADE a diferentes frecuencias. * Problemas con el control de desplazamiento a altas frecuencias. 82

4.4. Valores numéricos de los parámetros obtenidos en los ensayos EBADE realizados a los diferentes betunes. 84

4.5. Valores numéricos de los parámetros obtenidos en los ensayos EBADE realizados para diferente número de ciclos por escalón de deformación. 89

4.6. Valores numéricos de los módulos complejos en el ciclo 200 en los ensayos de barrido de tiempo 95

4.7. Valores numéricos para los tres parámetros calculados en los ensayos de barrido de deformaciones ascendentes. 96

4.8. Valores numéricos de los módulos complejos y las densidades de energía disipadas al final de algunos de los escalones de los ensayos de barrido de deformaciones. 101

4.9. Valores numéricos de los módulos complejos y las densidades de energía disipadas después de 5,000 en los ensayos de barrido de tiempo. 101

Capítulo 1

Introducción y objetivos

Un fallo muy común de los pavimentos asfálticos es la fisuración y agrietamiento de las capas de mezclas asfálticas por acción de las cargas repetidas del tráfico y de los agentes meteorológicos. Las cargas de tráfico producen un estado de solicitación en las capas de mezcla bituminosa muy inferiores a las que daría lugar su fisuración y agrietamiento bajo la aplicación de una carga monotónica de amplitud creciente. Esto no es impedimento para que las cargas repetidas del tráfico produzcan su fisuración por acumulación de pequeños deterioros y daños, fallo conocido en la técnica de carreteras como fisuración por fatiga.

Los agentes meteorológicos (temperatura, radiación solar, precipitaciones, viento, etc,...) influyen también en la fisuración de los pavimentos asfálticos. En primer lugar, modificando su comportamiento y respuesta frente a las cargas del tráfico. Las mezclas bituminosas son muy sensibles a las variaciones térmicas. Esto hace que tanto su rigidez como su resistencia varíe a lo largo del día en función de la temperatura a que se encuentre la capa de mezcla bituminosa en el firme, lo que afecta en consecuencia a su fallo por fatiga. No es lo mismo analizar el fallo de un pavimento asfáltico a 20°C que cuando se encuentra por debajo de 0°C. Por otra parte, los agentes climatológicos originan también un cambio de las propiedades mecánicas de las mezclas en el tiempo. La temperatura, el viento y, en especial, las radiaciones solares van produciendo un envejecimiento progresivo del betún que transforma la respuesta de las mezclas bituminosas, de un material flexible y dúctil en un material rígido y frágil, afectando todo ello a su resistencia a la fisuración por fatiga bajo las cargas repetidas del tráfico.

Por otra parte, los agentes climatológicos, en particular las tensiones térmicas que se producen en el firme al bajar la temperatura de las mezclas bituminosas, pueden ser también un agente activo de fisuración. Las tensiones térmicas pueden fisurar la mezcla bituminosa cuando éstas alcanzan la resistencia de la mezcla a tracción bajo cargas monotónicas crecientes, pero también se pueden sumar a las tensiones del tráfico favoreciendo y agravando su efecto en el fallo por fatiga del firme.

En resumen el fallo por fatiga del firme, aunque en principio se asocia solo a cargas del tráfico, es un problema bastante más complejo en el cual tiene

una gran influencia la variación del comportamiento mecánico de la mezcla por efecto de los agentes climatológicos y de las tensiones térmicas causadas por éstos.

En el análisis de la respuesta de las mezclas bituminosas y de los betunes asfálticos frente al proceso de fatiga se ha tomado como referencia los estudios de fatiga sobre metales. Al igual que en el caso de los metales se han seguido dos líneas de investigación, una fenomenológica y experimental basada en la realización de ensayos en que se someten los materiales a la aplicación de cargas repetidas hasta llegar a su deterioro y fisuración y, otro, de tipo analítico en que se relaciona la propagación de la fisura con el estado tensional a que está sometido el material. En un principio, el procedimiento que se aplicó para estudiar la respuesta de las mezclas bituminosas a fatiga fue el experimental. Se desarrollaron diferentes procedimientos de ensayo (ménsulas, vigas con dos o tres puntos de apoyo, tracción indirecta, etc,...), pero el ensayo que más aceptación ha tenido es el ensayo a fatiga a flexotracción de vigas con tres o cuatro puntos de apoyo. De la aplicación de estos ensayos, que serán expuestos más adelante se obtiene la relación entre la tensión y/o deformación impuesta, y el número de aplicaciones de carga que toma en general una expresión logarítmica [1]:

$$\log N = a - b \cdot \log(\sigma\,,\,\varepsilon) \tag{1.1}$$

En estos ensayos se analiza el deterioro del material a partir de la evolución de la tensión (ensayos a deformación controlada) o de la deformación (ensayos a tensión controlada), con lo que se monitoriza el módulo del material con el paso de los ciclos, hasta establecer el fallo del material cuando esta variable alcanza un valor límite muy inferior del valor inicial (50-20 %), y que se asocia con su fallo.

Uno de los problemas que presenta este tipo de ensayos es precisamente establecer el criterio de fallo, cúal es el valor inicial a considerar y qué reducción debe considerarse como el fallo del material. Esto es debido a que las mezclas bituminosas tienen un comportamiento mecánico visco-elástico no lineal y es difícil separar, al ir descendiendo el valor del parámetro mecánico seleccionado, lo que es tixotropía de lo que es daño y, cuando este daño es irreversible o bien todavía se puede producir una recuperación significativa (*healing*) de las propiedades mecánicas del material ensayado. Por otra parte, estos ensayos requieren unos equipos y prensas especiales y son de larga duración. Ensayar una sola probeta puede requerir a veces varios días. Esto ha llevado a proponer nuevos procedimientos de ensayo que permitan evaluar más rápidamente las propiedades resistentes de las mezclas bituminosas frente a su fisuración por fatiga, entre ellos, los que determinan la energía de fractura de las mezclas [8, 28, 60] o los que evalúan el comportamiento a fatiga de las mezclas y de los betunes a partir de su módulo inicial y de su deformación de fallo en un ensayo de barrido de deformaciones.

Éste es el procedimiento seguido en esta tesis doctoral, en el que partiendo de los trabajos desarrollados en el Laboratorio de Caminos de la Universitat Politècnica de Catalunya, en los que se puso de manifiesto en ensayos a tensión

controlada la existencia de una deformación crítica, tanto en betunes [48] como en mezclas bituminosas [8], a partir de la cual se producía rápidamente el fallo de fatiga. Se decidió intentar aplicar esta hipótesis en la caracterización de betunes, aplicando un ensayo de barrido de deformación bajo carga cíclica de tensión-compresión con el objetivo de obtener esta deformación crítica. En el caso de que estas hipótesis resultasen válidas, este tipo de ensayos ofrecería una serie de ventajas muy significativas en la caracterización y evaluación de los betunes frente al fallo por fatiga, lo que permitiría una más fácil y rápida selección de éstos para su uso en la fabricación de mezclas bituminosas y poder así optimizar su respuesta frente al fallo de fisuración por fatiga.

En el desarrollo de este nuevo ensayo ha sido necesario evaluar la energía disipada en el mismo en cada modo de carga. En este caso se trata de materiales viscoelásticos donde es importante analizar y diferenciar entre lo que es la energía aplicada en la deformación y recuperación visco-elástica del material y lo que va produciendo su daño y deterioro. Es por ello que más adelante se describen las ecuaciones que rigen el comportamiento de los materiales viscoelásticos, así como los modelos de daño que han ido desarrollándose a partir de la ley de Paris y los modelos visco-elásticos de daño. El documento continua describiendo el ensayo propuesto, así como el trabajo experimental realizado. El análisis de estos resultados ha sido recogido en cuatro artículos publicados en revistas internacionales con factor de impacto, también contenidos en esta memoria. No obstante estos resultados son recogidos y expuestos de forma unitaria, para poder correlacionarlos mejor. Finalmente, en el último capítulo se recogen las conclusiones del estudio.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Fatiga

El fenómeno de la fatiga de los materiales fue estudiado por primera vez durante la segunda mitad del siglo XIX. Fue el ingeniero alemán August Whöler el primer investigador en estudiar el problema [52]. Por aquel entonces (1852) le fue asignada la labor de investigar las causas de la fractura de los ejes de acero de las locomotoras de la época. Para ello Whöler desarrolló ensayos en los que los ejes se veían sometidos a un gran número ciclos de carga, muy por debajo de la carga de rotura del material. Fruto de estos estudios Whöler desarrolló lo que más tarde se conocería como Curvas S-N o Curvas de Whöler. En estas curvas se representa el esfuerzo aplicado al material frente al número de ciclos hasta fallo en escala logarítmica (ecuación 2.1 y figura 2.2).

$$\sigma = a \cdot N^{-b}, \tag{2.1}$$

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

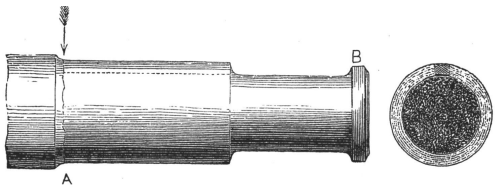


Figura 2.1: Esquema de un eje de locomotora fatigado, dibujado por Joseph Glynn en 1843.

Este tipo de curvas se emplean para determinar la vida útil de un material, en términos de aplicaciones de carga que puede soportar, para un esfuerzo dado.

Aunque durante la primera mitad del siglo XX este fenómeno fue ampliamente estudiado en metales, no fue hasta 1955 que la AASHO (American As-

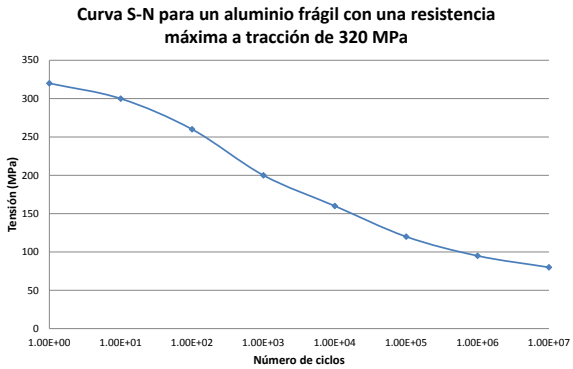


Figura 2.2: Curva de Whöler

sociation of State of Highways Officials) incluyó el deterioro por fatiga como un parámetro a tener en cuenta en el diseño de firmes.

En 1961 Pell *et al.* [42] llevaron a cabo ensayos de fatiga en ligantes y en mezclas bituminosas a temperaturas de entre -13.5ºC y +25ºC, determinando que era posible emplear el concepto de las curvas de Whöler en los materiales bituminosos. Adicionalmente, mostraron que en ensayos a diferentes temperaturas y velocidades de aplicación de carga, el factor que más afecta a la vida a fatiga es la deformación, en lugar de la tensión.

Durante los últimos treinta años se han realizado multitud de estudios sobre la resistencia a fatiga de los materiales bituminosos, especialmente en la mezcla final. Por otro lado, la cantidad de estudios centrados en el comportamiento a fatiga de los ligantes bituminosos por si solos ha sido más reducida.

2.2. Fatiga en mezclas bituminosas

Aunque esta tesis doctoral se centra en el estudio del comportamiento a fatiga de los ligante bituminosos, el uso final de estos es la elaboración de mezclas bituminosas para su ejecución en pavimentos. Por ello, en esta sección se realiza un resumen sobre el estudio del comportamiento a fatiga de estos materiales, el cual esta relacionado con las propiedades de los ligantes que las componen.

El comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas ha sido ampliamente estudiado en las cuatro últimas décadas, pero al tratarse de un fenómeno tan complejo y condicionado a múltiples factores, no existe en la actualidad un procedimiento de ensayo universal que lo caracterice completamente. Existen multitud de métodos de ensayo, pero los más aceptados por la comunidad científica son los que se muestran en la figura 2.3.

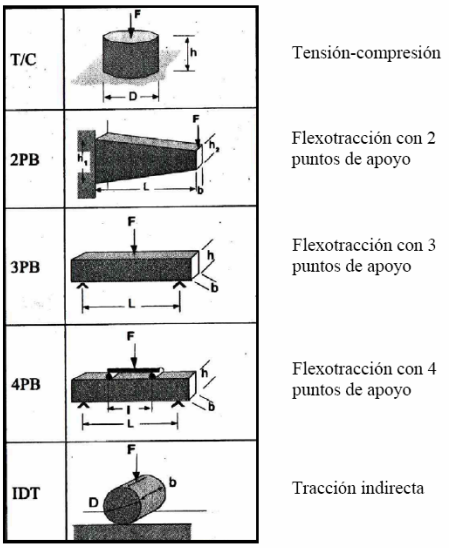


Figura 2.3: Configuraciones de los ensayos de fatiga comúnmente empleados para evaluar mezclas bituminosas [8]

El objetivo de todos estos ensayos 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 con el número de ciclos que ésta puede soportar antes de llegar al fallo. Con ello se pretende estimar la vida útil de un firme compuesto por esta mezcla bituminosa.

En las siguientes secciones se describen algunos de los ensayos de fatiga más empleados y/o de especial interés para esta tesis doctoral.

2.2.1. Ensayo de flexión en dos puntos sobre probetas trapezoidales

Este ensayo se realiza en probetas de forma trapezoidal a desplazamiento controlado, a una frecuencia de 25 Hz y una temperatura de 20°C, figura 2.4. 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.

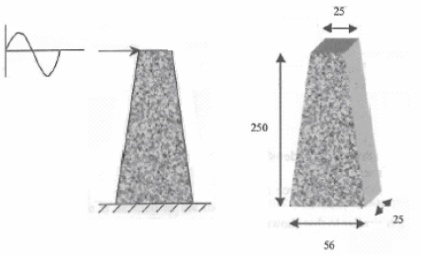


Figura 2.4: Ensayo de flexión en dos puntos sobre probetas trapezoidales [48]

El procedimiento de ensayo consiste en fijar la probeta por la base mayor y aplicar un desplazamiento senosoidal de amplitud constante en la parte superior, de tal forma que se registre la fuerza que soporta la muestra durante el ensayo. El ensayo finaliza cuando la fuerza determinada en el ciclo 100 se reduce a la mitad. Para poder establecer la ley de fatiga de la mezcla bituminosa, es necesario realizar por lo menos ensayos a tres desplazamientos diferentes.

2.2.2. Ensayo de flexión en dos puntos sobre probetas prismáticas

Esta prueba se efectúa en el modo de carga controlada utilizando especímenes prismáticos de 40x40x60 mm de base, ancho y altura respectivamente, figura 2.5.

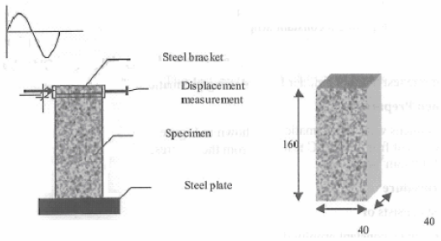


Figura 2.5: Ensayo de flexión en dos puntos sobre probetas prismáticas [48]

El procedimiento de prueba consiste en imponer una carga senosoidal de amplitud constante en la parte superior de la probeta y registrar los desplazamientos durante todo el ensayo. El ensayo se realiza a una frecuencia de 25 Hz y a una temperatura de 20°C. Se considera que la muestra se ha fallado cuando el desplazamiento alcanza un valor igual al doble del inicial. De igual manera que en el ensayo sobre probetas trapezoidales, para determinar la ley de fatiga de la mezcla bituminosa, es necesario realizar ensayos por lo menos a tres niveles de carga diferentes.

2.2.3. Ensayo de flexión en tres puntos sobre probetas prismáticas

El ensayo se realiza sobre muestras prismáticas de 50x50x300 mm, apoyadas en sus extremos con una luz libre de 270 mm. En el centro de la probeta se aplica una señal senoidal de desplazamiento de amplitud constante y frecuencia de 10 Hz. La deformación de la muestra se mide mediante un extensómetro ubicado en la fibra inferior de la probeta, figura 2.6. El fallo se produce cuando la carga necesaria para provocar el desplazamiento central se reduce a la mitad. La deformación medida se utiliza para calcular el módulo complejo inicial, el ángulo de desfase y la evolución de la deformación con los ciclos de carga.

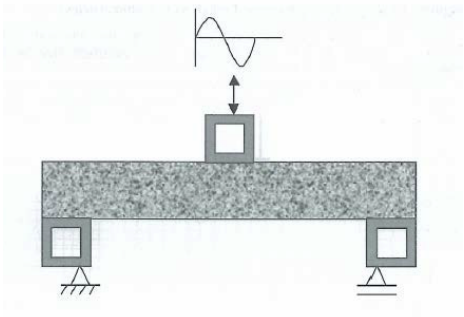


Figura 2.6: Ensayo de flexión en tres puntos sobre probetas prismáticas [48]

Este ensayo era el procedimiento empleado comúnmente en España hasta la introducción de la nueva normativa europea armonizada, y se encuentra recogido como tal en la norma NLT-390/50.

2.2.4. Ensayo de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas

El ensayo de fatiga en cuatro puntos consiste en aplicar una señal senoidal de deformación en el centro de la probeta, figura 2.7. Las dimensiones de la probeta son de 50x50x400 mm de base, ancho y longitud respectivamente. El procedimiento consiste en ensayar probetas a deformación controlada [56], y el fallo se define como los ciclos necesarios para que el módulo de rigidez se reduzca a la mitad. Las dos primeras probetas se ensayan a niveles de deformaciones altos (entre 600 y 800 microdeformaciones) de forma que alcancen el fallo en pocos ciclos de carga (entre 2.000 y 30.000 ciclos). La tercera probeta se ensaya a una deformación media (entre 400 y 500 microdeformaciones) de forma que la muestra falle alrededor de 100.000 ciclos. La última probeta se ensaya a una deformación baja (entre 200 y 300 microdeformaciones) y puede soportar alrededor de 500.000 ciclos de carga.

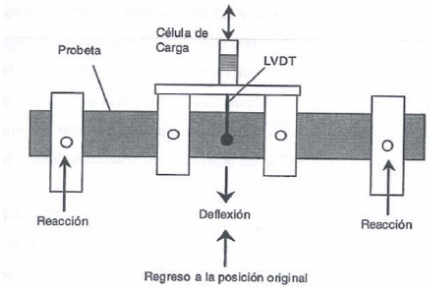


Figura 2.7: Ensayo de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas [48]

Este ensayo ha sido utilizado ampliamente en países como E.E.U.U. y Alemania. El procedimiento se encuentra contenido en la nueva normativa europea UNE-EN 12697-24 y actualmente se está convirtiendo en el método más empleado para caracterizar el comportamiento a fatiga de mezclas bituminosas.

2.2.5. Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas

El ensayo de fatiga a tracción indirecta se realiza sobre muestras cilíndricas fabricadas en laboratorio o procedentes de la extracción de testigos de obra. El procedimiento consiste en aplicar cargas a compresión diametral aplicando una señal senoidal de una frecuencia de 10 Hz, y medir las deformaciones producidas en la dirección perpendicular a la carga, figura 2.8. El ensayo finaliza cuando la deformación horizontal aumenta bruscamente o de forma rápida, indicando el fallo.

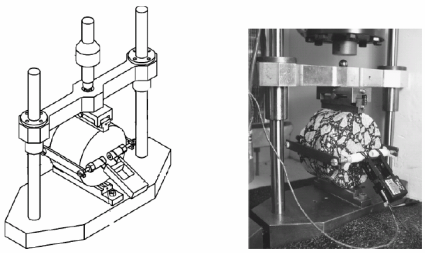


Figura 2.8: Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas [48]

2.2.6. Ensayo de fatiga a tracción directa CTD

El ensayo CTD (Cataluña Tracción Directa) fue desarrollado por el Laboratorio de Caminos de la Universitat Politècnica de Catalunya [8], y consiste en someter una probeta prismática a esfuerzos de tracción y compresión sujetándola a los extremos de la máquina de ensayo mediante unas placas de acero adheri-

das a los extremos de la muestra. Este procedimiento permite realizar ensayos de configuración de carga uniaxial, tanto cíclicos como estáticos a deformación, desplazamiento o carga controlada. El montaje experimental se muestra en la figura 2.9

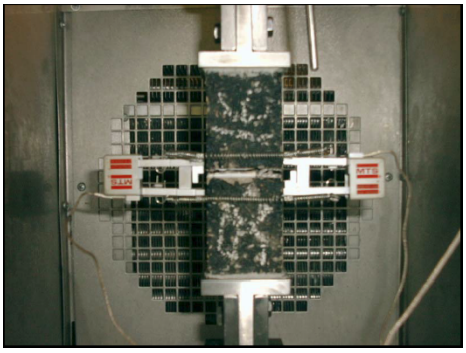


Figura 2.9: Ensayo de tracción directa sobre probetas prísmaticas [8]

Con esta configuración es posible realizar ensayos de fatiga manteniendo la deformación aplicada a la probeta constante, por medio de los extensómetros que se muestran en la figura 2.9. El desplazamiento vertical del pistón puede ser controlado directamente por cualquiera de los dos extensómetros, 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, y finalmente se obtiene la curva de degradación del módulo de la muestra con el número de ciclos para una deformación dada. Repitiendo este proceso para diferentes deformaciones y estableciendo un criterio de fallo, es posible obtener la ley de fatiga del material. También es posible realizar el ensayo a tensión controlada.

2.2.7. Criterios de fallo

Debido al marcado comportamiento viscoelasto-plástico de las mezclas bituminosas, determinar el fallo de una muestra no es un proceso sencillo. A diferencia de otros materiales, en los cuales el fallo puede caracterizarse como, por ejemplo, la división en dos de una viga, las mezclas bituminosas rara vez sufren roturas totales en ensayos de cargas cíclicas. Por ello, para determinar que una probeta de este material ha fallado, se imponen unas condiciones relacionadas con sus propiedades mecánicas. Estas condiciones se conocen como criterios de fallo. Por lo tanto se hace necesario monitorizar en tiempo real las propiedades mecánicas del material durante este tipo de ensayos con el objeto de determinar el ciclo en el que el criterio de fallo se cumple. A continuación se detallan los diferentes criterios de fallo empleados en ensayos de fatiga de mezclas bituminosas.

Criterio convencional

El criterio convencional, como su propio nombre indica, es el más empleado en este tipo de ensayos. Se basa en el principio de que la degradación del material puede ser caracterizada en base a su módulo rigidez, sea cual sea el método de obtención de éste. De forma totalmente arbitraria se fija un porcentaje de pérdida de módulo por encima del cual se considera que las propiedades mecánicas de la mezcla son insuficientes y por lo tanto se ha producido el fallo del material. Típicamente este valor es el 50 % del módulo inicial. En ensayos a deformación controlada este criterio se cumple cuando la carga registrada por el equipo de ensayo se reduce a la mitad, y en ensayos a carga controlada, cuando la deformación experimentada por la probeta aumenta hasta el doble de la deformación inicial.

Este criterio tiene la ventaja de ser de muy fácil aplicación, pero presupone que toda la pérdida de módulo que experimenta la mezcla es debida al daño irreversible provocado, y esto, como se demostrará a lo largo de esta tesis, no es cierto.

Criterio de daño

Este criterio de fallo se basa en la premisa de que la mezcla no falla de forma brusca cuando es sometida a un ensayo de amplitud de deformación constante, sino que existe un daño continuo y diferencial por etapas durante el ensayo. En concreto, el ensayo se divide en tres fases, figura 2.10.

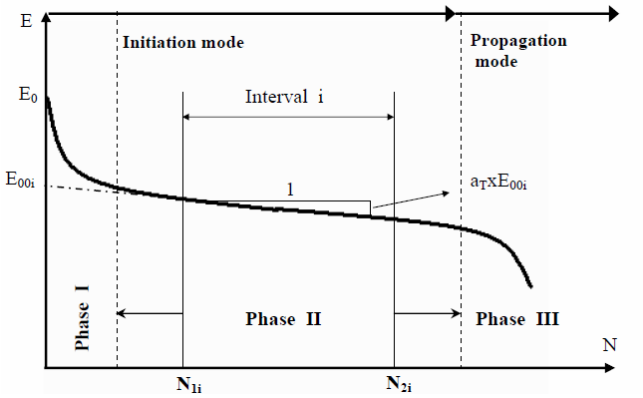


Figura 2.10: Definición de las tres fases que tienen lugar en un ensayo de fatiga a deformación constante [24]

En la primera fase se produce un decremento muy importante y brusco del módulo del material que es típicamente asociado efectos no lineales (reacomodamiento de las partículas, tixotropía, calentamiento, etc.,...). La segunda fase se denomina quasi estacionaria ya que durante ésta 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. Por último, en la tercera fase se produce

un descenso súbito de módulo del material asociado a la interconexión de las macrogrietas que produce el fallo total de la probeta.

Di Benedetto *et al.* [22] propusieron un método para obtener un parámetro de daño, analizando la segunda fase del ensayo y definieron el criterio de fallo basado en el daño como el punto de la curva en el que se produce la transición entre la segunda y tercera fase. Empleando este criterio se obtuvieron dispersiones en los resultados mucho menores a las resultantes de aplicar el criterio convencional. Como se mostrará a lo largo de esta tesis, este criterio proporciona información más fiable sobre el fallo del material que el criterio convencional.

Criterio de energía disipada

Por medio del criterio de la energía disipada se intenta correlacionar el daño por fatiga con la energía disipada durante el desarrollo del ensayo cíclico.

La energía disipada por ciclo, W_i, se calcula empleando la ecuación 2.2. En ensayos de fatiga controlados por deformación, esta energía 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.

$$W_i = \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin \delta_i, \tag{2.2}$$

donde W_i es la energía disipada en el ciclo i, σ_i y ε_i la amplitud de tensión y deformación en el ciclo i y δ_i el desfase entre ambas.

Derivada de la ecuación anterior, la energía acumulada durante el ensayo completo a fatiga de la mezcla se representa mediante la ecuación 2.3.

$$W_f = \sum_{i=1}^{N_f} \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin \delta_i, \tag{2.3}$$

Criterio de ratio de energía disipada

Pronk [45] definió a partir del cociente entre la energía total disipada en un ensayo y la energía disipada en el último ciclo, ecuación 2.4, el número de ciclos de carga que una probeta podría soportar en un ensayo a deformación controlada.

$$DER = \frac{\sum_{i=1}^{n} \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin \delta_i}{\pi \sigma_n \varepsilon_n \sin \delta_n}, \tag{2.4}$$

donde DER representa el cociente entre la energía disipada acumulada hasta el ciclo n y la energía disipada en el ciclo n

El estudio se fundamentó en encontrar el punto donde se inician las micro-grietas y se transforman en una fisuras visibles. Dicho punto, se estableció en ensayos a deformación controlada, cuando de la curva de ratio de energía disipada con los ciclos de carga se separa de una línea tangente a 45º. En ensayos a tensión controlada, corresponde al valor máximo, figura 2.11.

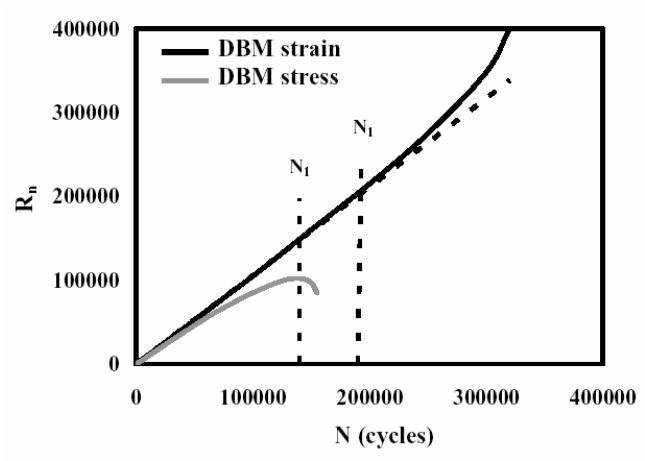


Figura 2.11: Definición de ciclo de fallo, utilizando el criterio de ratio de energía disipada para ensayos a tensión y deformación controlada [8]. R_n: Ratio de energía disipada, DBM strain: Ensayo a deformación controlada, DBM stress: Ensayo a tensión controlada.

Criterio de la deformación de rotura

Este criterio se basa en el análisis de la evolución de la deformación durante los ensayos cíclicos a tensión controlada. La curva deformación-ciclos muestra un punto en el que el aumento de la deformación se hace crítico, que sería el número de ciclos para el cual se produce el fallo por fatiga.

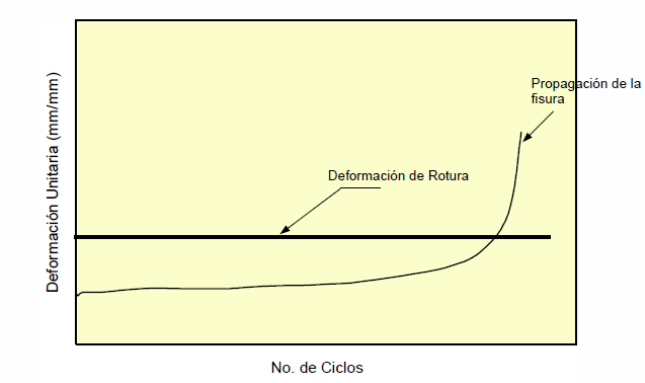


Figura 2.12: Evolución de la deformación unitaria con el número de ciclos de carga aplicados. [8]

2.3. Fatiga en ligantes bituminosos

Dado que esta tesis doctoral tiene como tema principal el estudio de la fatiga en ligantes bituminosos, en esta sección se resumen algunos de los trabajos de investigación más destacados que hacen referencia al comportamiento a fatiga de estos materiales. En el estudio de estos materiales se emplean conceptos y ensayos mencionados con anterioridad y otros más específicos que se describen a continuación.

La investigación en el comporatmiento a fatiga de los ligantes bituminosos tuvo su primer gran impulso durante el desarrollo del SHRP (Strategic Highway Research Program) en los Estados Unidos entre los años 1987 y 1993, que dió como resultado lo que se conoce como Superpave. El Superpave (SUperior PERforming asphalt PAVEments) [30] consistía básicamente en tres apartados: una especificación de ligantes, basado en las temperaturas máximas y mínimas a las que este ligante presenta ciertas propiedades, un método de diseño de mezclas bituminosas basado en las propiedades volumétricas de éstas y unos métodos de ensayo y predicción de comportamiento de las mezclas bituminosas. En particular, una de las aportaciones consistió en el empleo del reómetro de corte dinámico (comúnmente conocido como DSR por su siglas en inglés) para determinar el módulo complejo (G^*) y el ángulo de desfase (δ) de los ligantes a diferentes temperaturas. Empleando estos dos parámetros se fijaron unos valores de referencia que deberían servir para garantizar que los ligantes ensayados eran resistentes a las deformaciones plásticas por un lado, y resistentes a la fisuración por fatiga por el otro. El cociente $G^*/\sin\delta$ debería ser como mínimo 1.00 kPa en ensayos a 10 rad/s para evitar problemas de deformaciones plásticas, determinando así una temperatura máxima de servicio. Por su parte, el producto $G^* \cdot \sin\delta$ debería ser como máximo 5.000 kPa en ensayos a 10 rad/s y en ligantes envejecidos mediante RTFOT[1] y PAV[2] a la temperatura media de servicio, que es la asociada en el programa SHRP con la fisuración por fatiga. El empleo de este parámetro se debe limitar a la componente viscosa, que es la relacionada con el deterioro y con la energía disipada.

En 1996 Boussad *et al.* [15] mostraron que el comportamiento viscoelástico lineal de las mezclas bituminosas está relacionado con el del ligante. Además hallaron una buena correlación entre la reología del ligante y los parámetros de la ley de fatiga de la mezcla bituminosa.

Un año más tarde Reese [47] relacionó las propiedades de los ligantes envejecidos con la vida a fatiga de las mezclas bituminosas, reforzando la teoría de que las propiedades del ligante juegan un papel muy importante en las propiedades mecánicas de la mezcla bituminosa, especialmente las relacionadas con el comportamiento a fatiga.

El mismo año, centrado en el estudio de la resistencia a fatiga de las mezclas bituminosas, Di Benedetto *et al.* [22] dividieron en tres etapas el proceso de

[1] *Rolling Thin Film Oven Test*: Ensayo de envejecimiento de ligantes que pretende simular el proceso de envejecimiento producido por el proceso de fabricación de la mezcla.

[2] *Pressure Aging Vessel*: Ensayo de envejecimiento de ligantes que pretende simular el envejecimiento producido por la exposición al medio durante el periodo de servicio, principalmente por oxidación como consecuencia de su contacto con el aire.

fatiga, división que también se observa claramente en los procesos de fatiga de los ligantes bituminosos en ensayos realizados a tensión o deformación constante. Al principio del ensayo tiene lugar una etapa durante la cual el material disminuye su rigidez, que algunos autores asocian con un aumento de su temperatura debido a la disipación viscosa interna [20]. Durante la segunda etapa el módulo decrece linealmente con el número de ciclos; ésta es la etapa de más duración. Finalmente tiene lugar una última etapa durante la cual el daño se propaga muy rápidamente hasta el fallo total [24], figura 2.13.

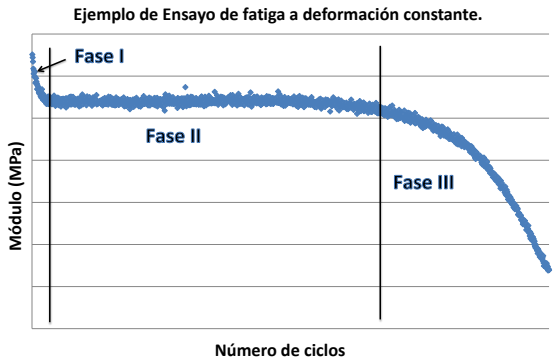


Figura 2.13: Definición de las tres fases que tienen lugar en un ensayo de fatiga a deformación constante.

Por otro lado, en 1999 Bahia *et al.* [12] determinaron que el parámetro $G^* \sin\delta$, obtenido en betunes mediante el reómetro de corte dinámico (DSR), no representaba adecuadamente el comportamiento a fatiga de la mezcla. Una de las aportaciones más importantes de este trabajo fue la propuesta de emplear el barrido de tiempo[3] en el DSR para evaluar el comportamiento a fatiga de los ligantes. Estableciendo el 50 % del módulo complejo inicial G_i^* como el umbral por debajo del cual se produce el fallo se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,82 cuando se comparó el número de ciclos hasta fallo de los ligantes con los de las mezclas bituminosas. Más tarde Anderson *et al.* [10] hicieron notar que las condiciones de ensayo del barrido de tiempo deben ser elegidas con cuidado para garantizar un fallo por fatiga en lugar de un despegue de la lámina de betún de la pletina del DSR.

Aun así, en 2002 la guía de la AASHTO [4] estableció unos límites para el valor del parámetro $G^* \sin\delta$ que a priori deberían garantizar un buen comportamiento a fatiga del ligante en el intervalo de temperaturas a las que se vería sometido el pavimento en servicio. Pero hasta la fecha varios autores [13, 58] han demostrado que estos límites no garantizan un adecuado comportamiento de las mezclas bituminosas en condiciones de fatiga.

[3] *Ensayo de Barrido de Tiempo*: Tipo de ensayo cíclico de fatiga en el cual se aplica una amplitud de deformación o tensión constante hasta que se produce el fallo del material ensayado.

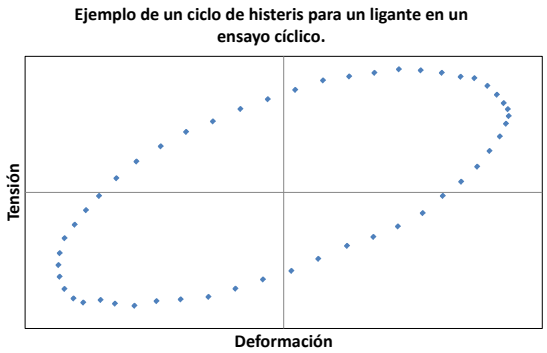


Figura 2.14: Ciclo de histéresis obtenido en un ensayo cíclico para un material bituminoso.

En 2005 Delgadillo y Bahia [21] aplicaron el concepto de la relación de energía disipada (DER por Dissipated Energy Ratio), introducido en el estudio de mezclas bituminosas por Pronk en 1995 [45], al estudio del comportamiento a fatiga de ligantes en el DSR. Cuando los materiales viscoelásticos se someten a cargas cíclicas la historia de carga muestra unos ciclos de histeresis en el diagrama tensión-deformación (figura 2.14) 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 como la *Energía Disipada* durante el ciclo de carga. El concepto del DER corresponde a evaluar el cambio del área de estos bucles ciclo a ciclo y se calcula según al ecuación 2.4. En la parte inicial del ensayo el DER aumenta de manera constante con el número de ciclos, al avanzar el ensayo el área del bucle disminuye y el valor del DER experimenta un aumento más rápido que el propio aumento del número de ciclos. Los autores asociaron la evolución del DER con el número de ciclos con los diferentes procesos que dan lugar al fallo por fatiga, iniciación y propagación de fisuras (figura 2.15).

Aunque la mayoría de los estudios sobre comportamiento a fatiga de los ligantes bituminosos han sido realizados empleando el reómetro de corte dinámico (DSR) recientemente han aparecido dos ensayos cíclicos que pretenden substituir este aparato.

Rompu *et al.* [49] adaptaron el reómetro anular de corte (*Annular Shear Rheometer*) para evaluar el comportamiento a fatiga de ligantes bituminosos mediante la aplicación de ciclos de esfuerzos cortantes, figura 2.16. Este aparato de ensayo permite cubrir un rango de frecuencias/temperaturas de ensayo más amplio que con el DSR, además de ser un ensayo más homogéneo [23]. El ensayo se llevó a cabo imponiendo una señal senoidal de deformación y midiendo el esfuerzo cortante al que se ve sometido el émbolo móvil. Durante el ensayo se realizaron pausas cada cierto número de ciclos en las cuales se aplicaron un reducido número de ciclos a deformaciones muy bajas y a diferentes frecuencias para hallar el valor del módulo complejo lineal. Adicionalmente el equipo

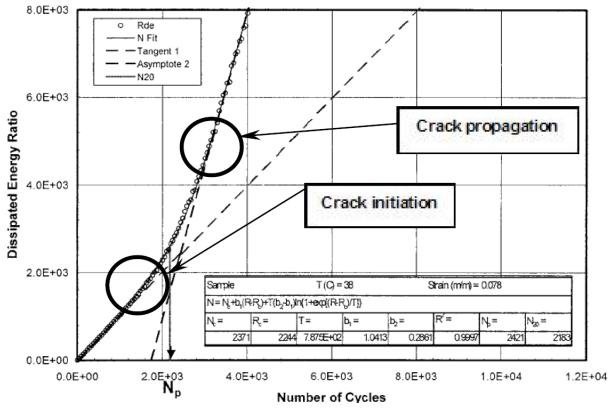


Figura 2.15: Evolución del DER en un ensayo a deformación controlada en el DSR [21].

disponía un sistema capaz de medir el módulo complejo del material a partir de la velocidad de propagación de un pulso en el ligante. La temperatura se mantuvo constante durante todo el ensayo en 10°C y la frecuencia del ensayo de fatiga fue de 10Hz.

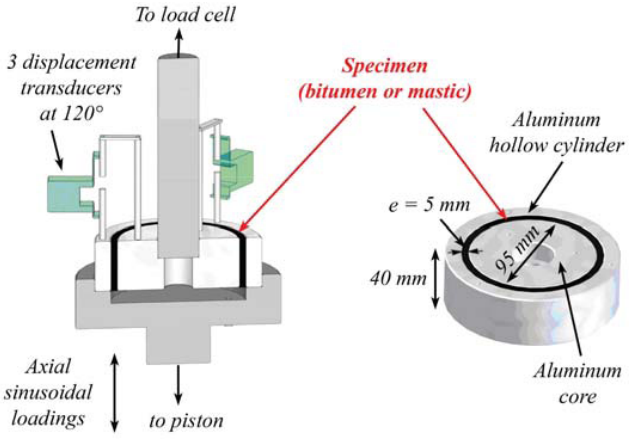
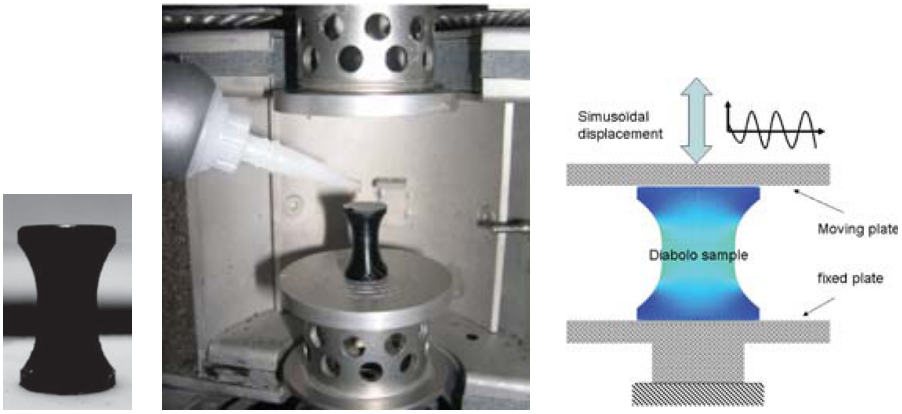


Figura 2.16: Vista esquemática del reómetro anular de corte [49].

Por otro lado, Chailleux *et al.* [17] han desarrollado recientemente un ensayo de fatiga para betunes a tracción-compresión, figura 2.17.

La probeta se adhiere a la máquina de ensayo empleando un adhesivo basado en el cianocrilato. La geometría de la probeta se escogió para garantizar que las tensiones más elevadas se concentraran en los "hombros" del diábolo, en lugar de en los extremos y evitar así un fallo del adhesivo.

El procedimiento de ensayo consiste en aplicar un desplazamiento senoidal del pistón móvil de la máquina y medir la carga resultante. El ensayo de fatiga



(a) (b) (c)

Figura 2.17: (a) Probeta diábolo después de desmoldar. (b) Probeta diábolo adherida a la máquina de ensayo. (c) Vista esquemática de la probeta sometida a tracción-compresión [17].

empieza con una serie de ciclos de acondicionamiento a una deformación muy baja que sirven para determinar el módulo complejo en el límite viscoelástico lineal. A continuación se aplica una deformación mucho mayor hasta que la probeta falla completamente. La temperatura de ensayo fue de 10°C y la frecuencia de la señal senoidal de desplazamiento impuesta de 10Hz.

2.4. Viscoelasticidad

Los ligantes bituminosos se caracterizan por tener un marcado comportamiento viscoelástico. Existe toda una teoría matemática que pretende describir este comportamiento. Por ello en esta sección se resume esta teoría que ha sido empleada por multitud de autores para explicar, predecir el comportamiento y establecer criterios de fallo de estos materiales, como se ha mostrado en la sección anterior [18].

Que un material presente un comportamiento viscoelástico significa que cuando está sometido a una carga, por ejemplo constante, presenta deformaciones diferidas en el tiempo, figura 2.18, y cuando se retira la carga el material vuelve a su estado inicial. Los ensayos que evalúan esta propiedad son los denominados ensayos de fluencia, en los cuales se impone una carga y se mide la evolución de la deformación con el tiempo [18].

Por otro lado, cuando estos materiales son sometidos a una deformación constante, la tensión con la que responden disminuye con el tiempo desde un valor máximo inicial, figura 2.19. Este tipo de ensayos se conocen como ensayos de relajación.

Este tipo de comportamiento dependiente del tiempo hace especialmente complicadas las ecuaciones constitutivas de este tipo de materiales, relación

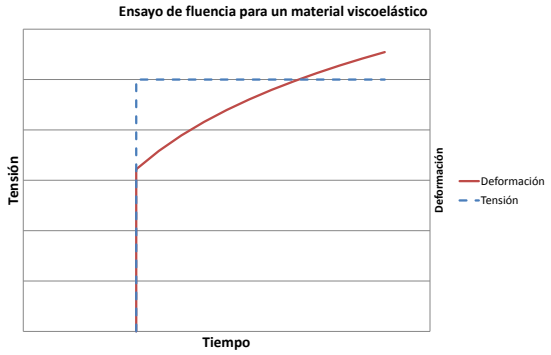


Figura 2.18: Ejemplo de un ensayo de fluencia

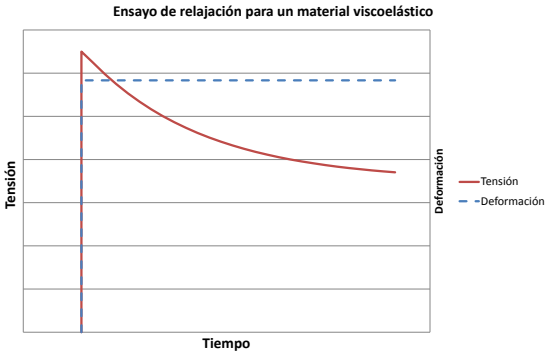


Figura 2.19: Ejemplo de un ensayo de relajación

entre tensión y deformación. A consecuencia de considerar las tensiones y deformaciones dependientes del tiempo, la ecuación constitutiva de este tipo de materiales toma la forma de la ecuación 2.5:

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^{T} E(T-t)\frac{d\varepsilon(t)}{dt}dt, \tag{2.5}$$

donde $E(T-t)$ es módulo de relajación dependiente del tiempo, σ es la tensión, ε la deformación, t la variable tiempo, T el tiempo final (duración del ensayo) y se considera que el ensayo dura lo suficiente como para alcanzar el estado estacionario (tiempo inicial $= -\infty$, el estado actual depende de la historia de carga anterior).

Este tipo de comportamiento presenta especiales dificultades cuando estos materiales se someten a cargas cíclicas. Por otro lado, el estudio del comportamiento a fatiga de materiales se suele llevar a cabo mediante ensayos cíclicos. Por lo tanto se hace necesario analizar en profundidad estas ecuaciones.

Suponiendo que sometemos al material viscoelástico a un estado de deformaciones oscilatorio estacionario, equivalente a aplicar un ensayo cíclico de amplitud constante a deformación controlada. En este caso la deformación aplicada al material vendría dada por una función oscilatoria del tipo 2.6:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 e^{i\omega t}, \tag{2.6}$$

donde ε_0 es la amplitud y ω la frecuencia de oscilación. Al considerar que el material alcanzará en algún momento un estado de oscilación estacionario, implícitamente se está suponiendo que el módulo de respuesta del material estará compuesto por dos partes: una dependiente del tiempo que dominará durante los primeros compases del ensayo y otra independiente del tiempo que dominará para $t \to \infty$, ecuación 2.7:

$$E(t) = E_\infty + \hat{E}(t), \tag{2.7}$$

donde

$$\hat{E}(t) \to 0 \quad cuando \quad t \to \infty$$

Substituyendo 2.6 y 2.7 en 2.5 se obtiene:

$$\sigma(t) = E_\infty \varepsilon_0 e^{i\omega T} + i\omega\varepsilon_0 \int_\infty^T \hat{E}(T-t) e^{i\omega t} dt \tag{2.8}$$

Realizando el cambio de variable $T - t = \eta$ la expresión 2.8 queda de la siguiente forma:

$$\sigma(t) = E_\infty \varepsilon_0 e^{i\omega T} + i\omega\varepsilon_0 \int_{+\infty}^0 \hat{E}(\eta) e^{i\omega(T-\eta)} (-d\eta) \tag{2.9}$$

$$e^{-i\omega\eta} = \cos\omega\eta - i\sin\omega\eta \tag{2.10}$$

$$\sigma(t) = \left[E_\infty + \omega \int_0^\infty \sin(\omega\eta)\hat{E}(\eta) d\eta + i\omega \int_0^\infty \cos(\omega\eta)\hat{E}(\eta) d\eta \right] \varepsilon_0 e^{i\omega T} \tag{2.11}$$

Para ser consistentes con las condiciones de oscilación estacionaria impuestas a la historia de deformación, la tensión deberá mostrar las mismas condiciones, ecuación 2.12:

$$\sigma(t) = E^*(i\omega)\varepsilon e^{i\omega t}, \tag{2.12}$$

donde $E^*(i\omega)$, módulo complejo, es una función compleja aún por determinar.

Descomponiendo $E^*(i\omega)$ en parte real y parte imaginaria, se obtiene:

$$E^*(i\omega) = E^{'}(\omega) + iE^{''}(\omega) \tag{2.13}$$

Combinando las ecuaciones 2.11 y 2.13 se obtiene:

$$E^{'}(\omega) = E_\infty + \omega \int_0^\infty \hat{E}(\eta) \sin(\omega\eta) d\eta \tag{2.14}$$

$$E^{''}(\omega) = \omega \int_0^\infty \hat{E}(\eta) \cos(\omega\eta) d\eta \tag{2.15}$$

$E^{'}$ y $E^{''}$ se denominan módulo elástico y módulo viscoso respectivamente. Es interesante examinar la forma que toman las relaciones 2.14 y 2.15 en los casos extremos. Para ello se integra por partes las dos relaciones para obtener:

$$E^{'}(\omega) = E_\infty + \hat{E}(0) + \int_0^\infty \frac{d\hat{E}(\eta)}{d\eta} \cos(\omega\eta) d\eta \tag{2.16}$$

$$E^{''}(\omega) = -\int_0^\infty \frac{d\hat{E}(\eta)}{d\eta} \sin(\omega\eta) d\eta \tag{2.17}$$

A frecuencia 0, suponiendo que las funciones de relajación son de tipo exponencial decayente, se obtiene:

$$E^{'}(0) = E_\infty = E(t)|_{t\to\infty} \tag{2.18}$$

$$E^{''}(0) = 0 \tag{2.19}$$

Es decir, a frecuencia 0 el módulo complejo tiene parte imaginaria nula, y por lo tanto deja de ser una función compleja, recuperamos el módulo para el caso estático. A frecuencia infinita, cambiando la $\omega\eta = \tau$, se puede demostrar que 2.16 y 2.17 dan como resultado:

$$E^{'}(\infty) = E_\infty + \hat{E}(0) = E(t)|_{t\to 0} \tag{2.20}$$

$$E^{''}(\infty) = 0 \tag{2.21}$$

Las ecuaciones 2.18 - 2.21 proporcionan los valores límite del módulo complejo con la función de relajación, o módulo de relajación, $E(t)$. Se observa que cuando la frecuencia aumenta considerablemente la parte imaginaria del módulo complejo se hace zero, y por lo tanto el material se comporta como un sólido elástico. Sin embargo, para procesos extremadamente lentos, frecuencia$\rightarrow$ 0, es necesario distinguir entre sólidos viscoelásticos y fluidos viscoelásticos. La distinción matemática entre estos dos estados de la materia no es trivial, aunque se puede realizar en términos de la parte desviadora del tensor de cuarto orden que relaciona las tensiones con las deformaciones, es decir, la parte del módulo que hace referencia a las tensiones de corte. Esta será cero para un fluido y no nulo y constante para un sólido. Teniendo en cuenta esto último, en el caso de un sólido viscoelástico, para frecuencias bajas las ecuaciones 2.18 y 2.19 predicen un comportamiento elástico, mientras que para un fluido viscoso la respuesta sería viscosa, un descenso del módulo de tipo exponencial decayante indefinido hasta llegar a zero. Como se mostrará en el capítulo de resultados de esta tesis, el comportamiento de los ligantes bituminosos a bajas frecuencias está mas cerca del de un fluido viscoso que el de un sólido. Sin embargo a frecuencias suficientemente altas el material presenta propiedades muy similares a las de los sólidos elásticos. Quedaría así corroborada toda la teoría matemática presentada en esta sección, si consideramos el betún como un material a medio camino entre un sólido viscoelástico y un fluido viscoso.

Por último, se puede reescribir la ecuación constitutiva de los materiales viscoelásticos en el estado estacionario 2.12 substituyendo el multiplicando de la exponencial $E^*(i\omega)$ por la norma de este número complejo y añadiendo a la exponencial un posible ángulo de desfase entre el módulo complejo y la deformación:

$$\sigma(t) = |E^*(i\omega)|\varepsilon_0 e^{i(\omega t+\delta)}, \tag{2.22}$$

donde:

$$|E^*| = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2} \tag{2.23}$$

$$\delta = \tan^{-1}\left[E''/E'\right] \tag{2.24}$$

El parámetro δ tiene un significado físico muy importante, ya que corresponde al retraso entre la deformación aplicada y la tensión medida en forma de ángulo, figura 2.20. Típicamente recibe el nombre de ángulo de desfase.

2.5. Teoria de Daño Viscoelástico Continuo (VECD)

La aplicación teoría de daño viscoelástico continuo (VECD) es, en la actualidad, uno de los métodos más empleados para caracterizar el comportamiento

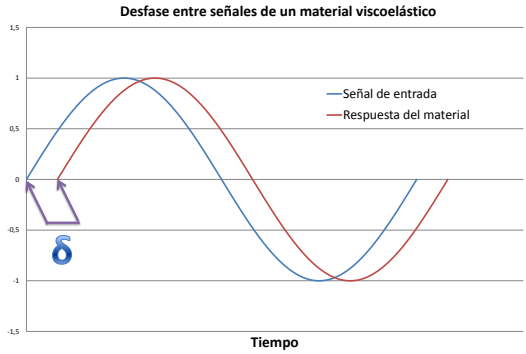


Figura 2.20: Ejemplo del desfase entre la aplicación de carga y la respuesta de un material viscoelástico

a fatiga de mezclas y ligantes bituminosos. En esta sección se resumen sus bases teóricas y su aplicación en ensayos de laboratorio.

El principal objetivo de este desarrollo es predecir la degradación del material y eliminar la dependencia con el tiempo del comportamiento de tipo histerético de la tensión frente a la deformación, tan característico de este tipo de materiales, ver sección 2.4, para finalmente obtener un número de ciclos hasta fallo dada una amplitud de deformación impuesta [35, 36]. Para ello, se utiliza la termodinámica de procesos irreversibles junto con un principio de correspondencia entre estados viscoelásticos lineales y no lineales, respectivamente, ambos desarrollados por Schapery [50, 51].

Según esta teoría el problema viscoelástico dependiente del tiempo se puede simplificar en una solución elástica lineal si se utiliza el concepto de la *pseudo-deformación*, la cual se define según la expresión 2.25

$$\varepsilon^R = \frac{1}{E^R}\int_0^T E(T-t)\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}dt = \frac{\sigma}{E^R}, \tag{2.25}$$

donde ε^R es la pseudo-deformación, E^R es un módulo de referencia (normalmente tomado como la unidad), $E(t)$ es el módulo de relajación viscoelástico lineal, T es el tiempo hasta el cual estudiamos el material y t es la variable de integración tiempo. Es de especial importancia remarcar que cuando E^R se toma como la unidad, ε^R corresponde a la tensión viscoelástica lineal.

El comportamiento no lineal causado por la distribución de microfisuras en el seno del material, se representa empleando la llamadas *variables internas de estado* [40], las cuales definen el aumento del daño en la muestra. En la implementación de un modelo de daño viscoelástico continuo, el primer paso es plantear las ecuaciones que caracterizan la evolución del daño en el material. Para ello se necesitan fundamentalmente tres expresiones:

- En primer lugar la relación entre las tensiones y las pseudo-deformaciones expresadas en función del parámetro o parámetros de daño, ecuación 2.26.
- A continuación es necesario definir la ley de evolución del daño en el material, ecuación 2.27. Es decir, como se degrada el material con el tiempo (con los ciclos de carga) y de que depende esta degradación. La gran mayoría de los modelos de daño viscoelástico continuo emplean la ley de Paris (descrita más adelante, ecuación 2.29) de propagación de grietas como punto de partida para proponer diferentes leyes de evolución del daño; por ello típicamente tienen forma de ecuación en derivadas parciales.
- Una vez definida la ley de evolución de daño, es necesario definir la expresión que permitirá integrar la ley de evolución de daño para poder obtener el daño que sufre el material en cada momento (número de ciclos o aplicaciones de carga) en función de propiedades medibles mediante ensayos de laboratorio del material, ecuación 2.28. En la ley de Paris, esta expresión es la definición del incremento del factor intensidad de tensiones, que depende a su vez de la configuración de carga, la geometría del cuerpo y la tensión aplicada a la muestra. Sin embargo en la aplicación de esta teoría a materiales viscoelásticos usualmente se emplean el módulo o la energía disipada en cada ciclo, y éstos a su vez son expresados en términos de la tensión y la pseudo-deformación aplicadas y medidas sobre el material.

Como ejemplo se presenta a continuación la aplicación de este método para el caso de un sólido viscoelástico bajo una configuración de carga uniaxial con un aumento del daño dependiente del tiempo. En este caso se muestra la forma más simple de la función *densidad de energía de pseudo-deformación* y una sola variable interna de estado, también conocida como parámetro de daño S, ecuaciones 2.26-2.28.

$$\sigma = \frac{\partial W^R}{\partial \varepsilon^R} = C(S)\,\varepsilon^R \tag{2.26}$$

$$\frac{dS}{dt} = \left(-\frac{\partial W^R}{\partial S}\right)^{\alpha}, \tag{2.27}$$

$$W^R = \frac{I_D}{2} C(S)\,(\varepsilon^R)^2 \tag{2.28}$$

donde σ es la tensión, W^R es la función de densidad de energía de pseudo-deformación, $C(S)$ es el *pseudo-módulo de rigidez* que se asume como una función de un solo parámetro de daño S, I_D es un parámetro relacionado con la rigidez inicial que se emplea para eliminar la variabilidad entre muestras, t es el tiempo y α es una constante del material relacionada con la tasa de aumento del daño. Teóricamente α depende de las características de la zona de fractura en la muestra. Si la energía de fractura (Γ) y la tensión de fractura son constantes, α puede expresarse como $\alpha = 1 + 1/m$, mientras que si además de Γ lo es el tamaño de la zona de fractura, se puede emplear $\alpha = 1/m$ [40]. En ambos casos m es la máxima pendiente obtenida en la representación gráfica del módulo de relajación frente al tiempo en escala doble logarítmica. Esta pendiente hace referencia a la susceptibilidad de los materiales a liberar energía

durante el proceso de fractura. Lee y Kim [37] sugirieron que $\alpha = 1 + 1/m$ es más adecuado para ensayos de tensión controlada, mientras que $\alpha = 1/m$ lo es para ensayos de deformación controlada. Toda esta discusión sobre la forma que debe tomar el parámetro α, de gran importancia en el resultado final, indica que ésta es quizás la parte más débil de todos los modelos desarrollados siguiendo este procedimiento.

La ecuación 2.27, evolución del daño de tipo potencial, tiene su origen en la suposición de que la evolución del daño en este tipo de materiales guarda cierta relación con la propagación de fisuras en un medio cuasielástico; en concreto con la ley de Paris de propagación de grietas, ecuación 2.29. Según esta expresión, el aumento de la longitud de una fisura con el número de ciclos depende de la amplitud del *factor intensidad de tensiones*.

$$\frac{dc}{dN} = A \cdot (\Delta K)^n, \tag{2.29}$$

donde c es la longitud de la fisura, N el número de ciclos de carga, A y n las constantes a determinar experimentalmente que caracterizan el comportamiento a fractura del material y ΔK es la amplitud del factor intensidad de tensiones. En este parámetro se introduce implícitamente la dependencia en la amplitud de tensión, la geometría del cuerpo y la longitud de la fisura. En la práctica, se realizan ensayos de fatiga en los cuales la geometría del cuerpo y la amplitud de tensión está controlada y se mide en tiempo real la longitud de la fisura, para obtener parejas de puntos dc/dN, ΔK y se ajusta la expresión 2.29, determinando así los parámetros A y n. Obtenida la ley de Paris del material, es posible determinar la vida residual de un material si se conocen el modo de carga al que está sometido y la longitud de una fisura. Un ejemplo de utilidad de este razonamiento sería la evaluación del estado de una estructura metálica. Mediante el escaneo con rayos X de la estructura, se pueden detectar y medir fisuras en el material, y una vez conocido el modo de carga de la sección analizada, se puede aplicar la ley de Paris para determinar la vida residual de la estructura. Por razones obvias la aplicación de este método a mezclas bituminosas presenta muchos inconvenientes: no se cumplen las condiciones de cuasielásticidad, sino que se trata de un material viscoelasto-plástico, y la realización de un ensayo en el que se monitorice la longitud de fisura en tiempo real es muy complicada dado el color negro del betún que complica cualquier tipo de análisis visual.

La ecuación 2.28 corresponde a la forma más simple de representar la energía disipada en el proceso en función de la pseudo-deformación y el pseudo-módulo en un ensayo monotónico uniaxial. Esta expresión aproxima la energía como el área de el triángulo rectángulo descrito por la tensión y la pseudo-deformación máximas en un ensayo de tracción uniaxial, figura 2.21.

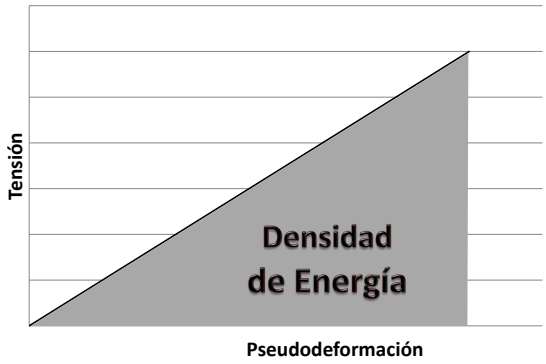


Figura 2.21: Aproximación del trabajo realizado en un ciclo como el área de un triángulo rectángulo

El uso de la pseudo-deformación elimina la componente viscosa, sin embargo si se representa la tensión frente a la deformación real se obtiene un ciclo de histéresis como el que se muestra en la figura 2.22.

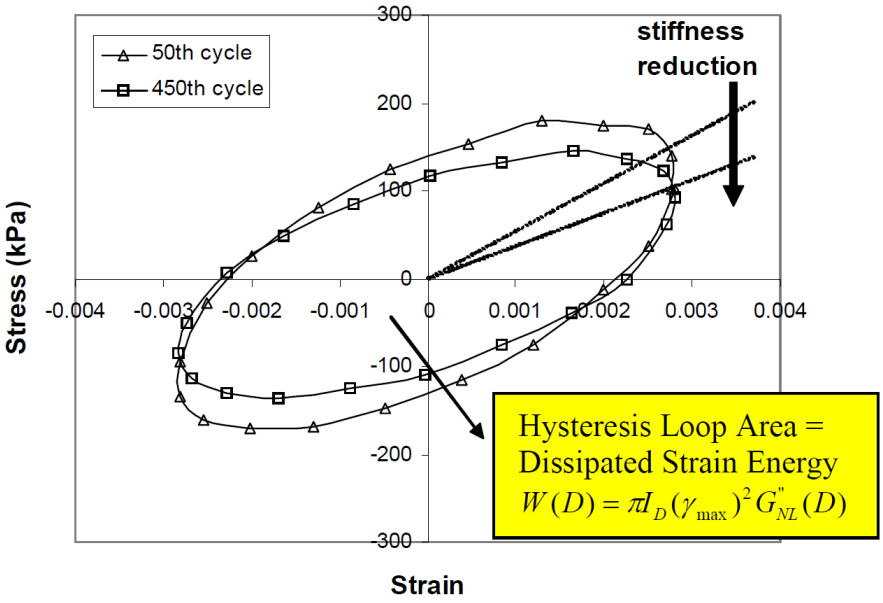


Figura 2.22: Aproximación del trabajo realizado en un ciclo como el área de una elipse [32]

Por ello, Kim *et al.* [32] propusieron una nueva aproximación para la densidad de energía de pseudo-deformación, en este caso haciendo referencia al ensayo de corte dinámico DSR, ecuación 2.2:

$$\sigma_{max} = I_D |G^*| \gamma_{max} \tag{2.30}$$

donde $|G^*|$ es el módulo de corte en el ciclo.

El desarrollo de la teoría de daño viscoelástico es más laborioso si se emplea la ecuación 2.2. El objeto de esta sección es ilustrar el empleo de esta teoría, y por ello se ceñirá al empleo de la ecuación 2.28 como función densidad de energía de deformación.

De esta forma, para el caso específico de un ensayo de tracción-compresión a frecuencia constante, los valores de la máxima pseudo-deformación (ε^R) y pseudo-módulo (C) en cada ciclo pueden ser calculados empleando las ecuaciones 2.31 y 2.32:

$$\varepsilon_N^R = |E^*|_{VEL} \varepsilon_0^N \tag{2.31}$$

$$C_N = \frac{|E^*|_N}{|E^*|_{VEL}}, \tag{2.32}$$

donde $|E^*|_{VEL}$ es el módulo dinámico viscoelástico lineal (antes de producirse daño), ε_0^N es la deformación máxima y $|E^*|_N$ es el módulo dinámico medidos en el N-ésimo ciclo, respectivamente.

Una expresión simple para el parámetro de daño S puede ser obtenida para el caso particular de un ensayo cíclico a frecuencia f constante introduciendo la ecuación 2.28 en la ecuación 2.27 y aplicando la regla de la cadena $\left(\frac{dC}{dS} = \frac{dC}{dt}\frac{dt}{dS}\right)$:

$$\frac{dS}{dt} = \left(-I \frac{(\varepsilon^R)^2}{2} \frac{dC}{dt}\right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \tag{2.33}$$

La derivada respecto del tiempo se puede substituir por la derivada respecto del número de ciclos dado que la frecuencia de ensayo es constante:

$$N = f \cdot t \rightarrow \frac{dN}{dt} = f \tag{2.34}$$

$$\frac{dS}{dN} f = \left(-I \frac{(\varepsilon^R)^2}{2} \frac{dC}{dN} f\right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \tag{2.35}$$

Para calcular de manera numérica el parámetro de daño S, la ecuación 2.35 puede ser discretizada como se muestra en las ecuaciones 2.36 y 2.37:

$$\frac{S_{N+\Delta N} - S_N}{\Delta N/f} = \left(-I\frac{(\varepsilon_N^R)^2}{2}\frac{f}{\Delta N}\left(C_{N+\Delta N} - C_N\right)\right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \tag{2.36}$$

$$S_{N+\Delta N} = S_N + \left(\frac{\Delta N}{f}\right)^{\frac{-1}{1+\alpha}}\left(-\frac{1}{2}I(\varepsilon_N^R)^2(C_{N+\Delta N} - C_N)\right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \tag{2.37}$$

donde S_N y $S_{N+\Delta N}$, y C_N y $C_{N+\Delta N}$ son los parámetros de daño y los pseudo-módulos en los N-ésimo y $(N + \Delta N)$-ésimo ciclos, respectivamente, ε_N^R la pseudo-deformación máxima en el N-ésimo ciclo, f la frecuencia y I se asume como $I = |E^*|_{N=1}/|E^*|_{VEL}$, donde $|E^*|_{N=1}$ es el módulo inicial y $|E^*|_{VEL}$ es el módulo viscoelástico lineal obtenido de la curva maestra obtenida para el módulo dinámico. Por esta razón I suele tomarse como 1 al asumir que el módulo inicial es igual al módulo dinámico en el rango viscoelástico lineal (no dañado).

El siguiente paso a seguir es determinar la expresión que mejor describe α. Como se ha comentado anteriormente, en función del tipo de ensayo la expresión que relaciona α con la pendiente del módulo de relajación frente al tiempo en escala doble-logarítmica, m, es diferente. Según la teoría del potencial trabajo, solo debe existir una curva C versus S característica para un mezcla dada, independientemente de la temperatura, frecuencia y modo de carga. Por lo tanto, para determinar la expresión que describe correctamente α hay que llevar a cabo ensayos cíclicos con una mezcla de referencia empleando diferentes frecuencias, temperaturas y modos de carga y calcular los valores de S en función de C empleando las diferentes expresiones sugeridas para α, ecuaciones 2.38 y 2.39:

$$\alpha = 1 + \frac{1}{m} \tag{2.38}$$

$$\alpha = \frac{1}{m} \tag{2.39}$$

La expresión adecuada será aquella que haga confluir todas las curvas C versus S en una sola, independientemente de la temperatura, frecuencia o modo de carga en el que hayan sido obtenidas. En la práctica, de las diferentes posibilidades, será aquella en la que las curvas difieran menos. Otra muestra más de la debilidad de esta parte fundamental del modelo.

Una vez escogida la expresión adecuada para α, y empleando las curvas C vs. S correspondientes, se debe ajustar a esta curva una expresión matemática, en este caso una exponencial como se muestra en la ecuación 2.40, sin embargo otros ajustes son posibles como por ejemplo una ley potencial [31]:

$$C = e^{a \cdot S^b} \tag{2.40}$$

Los valores de las constantes a y b serán aquellos que definan el mejor ajuste. Estas serán las constantes de calibración del modelo VECD para la mezcla bituminosa dada.

A modo de resumen, a continuación se presenta un lista simplificada de los pasos a seguir para calibrar el model VECD:

1. Llevar a cabo ensayos de determinación del módulo dinámico para obtener la curva maestra para $|E^*|$.

2. Calcular la curva maestra para $E(t)$ a partir de la hallada para $|E^*|$ como describieron Park y Schapery en [41].

3. Llevar a cabo ensayos de tracción-compresión a temperaturas intermedias en control de tensión y de deformación. Ambos tipos de ensayos deben dar como resultado la misma curva C (pseudo-módulo) vs. S (parámetro de daño).

4. Calcular los ciclos N, la amplitud de tensión máxima σ_0 y de deformación máxima ε_0.

5. Calcular C y S empleando el siguiente procedimiento, los tres últimos pasos se deben repetir de manera iterativa para cada ciclo medido:

   a) Obtener los parámetros mostrados en la ecuación 2.41

   b) Calcular $|E^*|_N$ y C_N como se muestra en la ecuación 2.42

   c) Calcular la pseudo-deformación, ecuación 2.43

   d) Calcular el S mediante la ecuación 2.44, teniendo en cuenta que el valor inicial de $S_0 = 0$.

6. Ajustar la ecuación $C = e^{a \cdot S^b}$ y obtener las constantes a y b.

$$f, \quad |E^*|_{VEL}, \quad \alpha, \quad N, \quad \sigma_N^0, \quad \varepsilon_N^0 \tag{2.41}$$

$$|E^*|_N = \frac{\sigma_0^N}{\varepsilon_N^0} \qquad C_N = \frac{|E^*|_N}{I|E^*|_{VEL}} \tag{2.42}$$

$$\varepsilon_N^R = |E^*|_{VEL}\varepsilon_0^N \tag{2.43}$$

$$S_{N+\Delta N} = S_N + \left(\frac{\Delta N}{f}\right)^{\frac{-1}{1+\alpha}} \left(-\frac{1}{2} I (\varepsilon_N^R)^2 (C_{N+\Delta N} - C_N)\right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \tag{2.44}$$

Todo este laborioso proceso permite obtener una expresión para el pseudo-módulo dinámico C en función del parámetro de daño S. Esta expresión será necesaria para poder determinar el número de ciclos hasta fallo en función de la deformación aplicada, que es el objetivo final de todo este proceso.

Recuperando la expresión 2.35 pero manteniendo la derivada parcial dC/dS se obtiene una ecuación diferencial que se puede resolver para obtener una expresión para el número de ciclos N en función del parámetro de daño S.

$$\frac{dS}{dN} f = \left(-\frac{(\varepsilon^R)^2}{2} \frac{dC}{dS} \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \tag{2.45}$$

$$\left(-\frac{(\varepsilon^R)^2}{2} \frac{dC}{dS} \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} f\, dS = dN \tag{2.46}$$

$$\int_0^{S_f} \left(-\frac{(\varepsilon^R)^2}{2} \frac{dC}{dS} \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} f\, dS = \int_0^{N_f} dN \tag{2.47}$$

$$N_f = \int_0^{S_f} \left(-\frac{(\varepsilon^R)^2}{2} \frac{dC}{dS} \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} f\, dS \tag{2.48}$$

La integral 2.48 se puede resolver de manera aproximada según la expresión 2.49:

$$N_f = \sum_{S=0}^{S_f} \left(-\frac{(\varepsilon^R)^2}{2} \frac{dC}{dS}|_S \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} f\, \Delta S_S, \tag{2.49}$$

donde S_f es el valor del parámetro de daño cuando C es igual al valor definido como umbral de fallo. Habiendo ajustado la función exponencial previamente para la curva C vs. S, la derivada dC/dS es inmediata. Para hallar el número de ciclos hasta fallo solo hay que dividir el intervalo $0 - S_f$ en incrementos ΔS y sumar todas las contribuciones para obtener un número de ciclos hasta fallo.

En resumen, la aplicación de la teoría viscoelástica de daño (VECD) es capaz de proporcionar un numero de ciclos hasta fallo para una mezcla o ligante dada una amplitud de deformación impuesta. Ahora bien, para ello es necesario realizar todo el proceso anteriormente descrito, para cada uno de los ligantes o mezclas que deban ser estudiados.

2.6. Deformación crítica

Continuando con la descripción de los procesos existentes para estimar el comportamiento a fatiga sin necesidad de realizar ensayos largos y costosos, existe un enfoque completamente distinto a los presentados hasta ahora en este estado del arte, propuesto por el Laboratorio de Caminos de la Universitat Politècnica de Catalunya en el 2005 [8].

Uno de los objetivos de la tesis doctoral del doctor Alonso, fue emplear un ensayo cíclico de tracción-compresión sobre mezclas bituminosas. Al analizar los datos obtenidos en ensayos de este tipo a tensión controlada se observó que el fallo total de las probetas se producía cuando la amplitud de deformación medida sobre la probeta alcanzaba un cierto valor, figura 2.23. El valor de deformación para el cual se producía el fallo parecía ser característico de cada mezcla a una temperatura y frecuencia de ensayo dadas, y se le dio el nombre de *deformación crítica*.

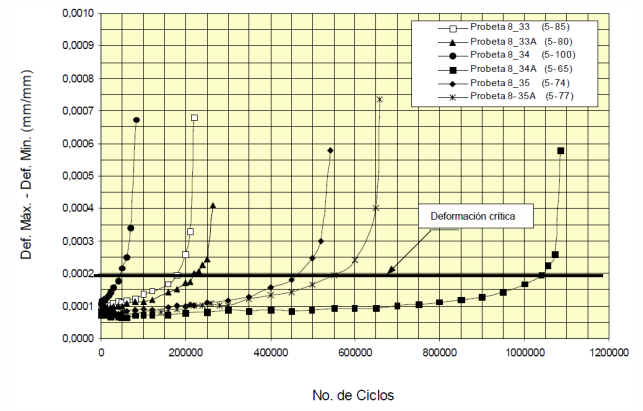


Figura 2.23: Evolución de la deformación unitaria con el número de ciclos de carga. Ensayo de fatiga a tracción directa CTD (tensión controlada) [8].

Con este resultado, se planteo la cuestión de caracterizar el comportamiento a fatiga de mezclas bituminosas analizando su módulo y su deformación de fallo, o deformación crítica. De esta manera, conociendo estos dos parámetros de una mezcla, sería muy sencillo clasificar mezclas según su comportamiento a fatiga. A igual módulo de rigidez, aquella mezcla con mayor deformación critica debería ser la que mejor comportamiento a fatiga exhiba.

Siguiendo con esta linea de investigación, en 2009 el doctor Reyes presentó su tesis doctoral centrada en el estudio de ligantes bituminosos [48]. Entre otros estudios llevados a cabo, se realizaron ensayos a tensión controlada empleando el reómetro de corte dinámico (DSR). Se observó como cada ligante presentaba un valor característico de deformación para el cual se producía el fallo del material, figura 2.24.

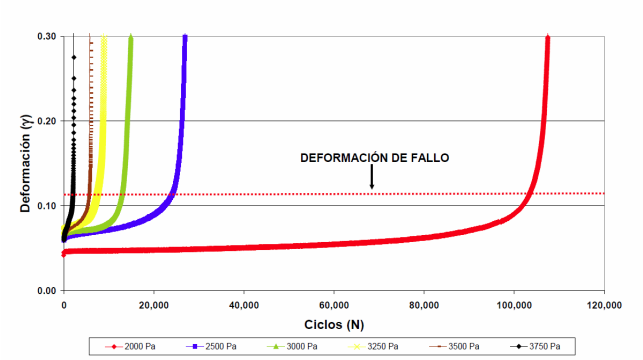


Figura 2.24: Evolución de la deformación con los ciclos para un betún B-40/50 y un rango de tensiones entre 2000 y 3750 Pa. [48].

Se definieron unos rangos de deformación para cada ligante, y se analizaron diferentes ligantes de diferentes penetraciones, con lo que se pudo generar un

gráfico donde se mostraba la evolución de la deformación crítica con la penetración del ligante, figura 2.25.

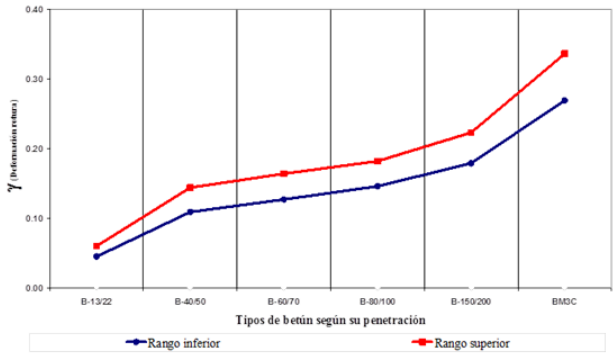


Figura 2.25: Rango de deformaciones de la zona de rotura de los betunes estudiados [48].

Finalmente, se realizaron ensayos de deformación controlada, en los que la amplitud de deformación aumentaba cada cierto numero de ciclos introduciendo periodos de reposo antes de cada aumento de ésta; este tipo de ensayos son denominados barridos de deformaciones y se describirán en la siguiente sección, figura 2.26. Con ello se pretendía analizar la influencia de los periodos de reposo en el comportamiento del ligante a diferentes amplitudes de deformación, efecto *healing*.

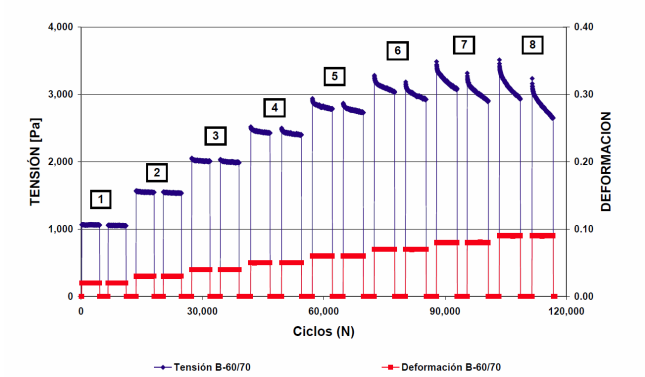


Figura 2.26: Comportamiento del betún B-60/70 al incremento de la amplitud de deformación y periodos de reposo [48].

Las dos tesis doctorales resumidas en este apartado, llevadas a cabo en el Laboratorio de Caminos de la Universitat Politècnica de Catalunya, bajo la tutela del profesor Félix E. Pérez Jiménez, marcaron la linea de investigación sobre la cual se ha desarrollado la presente tesis doctoral.

2.7. Barrido de deformaciones

Los objetivos principales de esta tesis doctoral son desarrollar y aplicar un ensayo cíclico de barrido de deformaciones para caracterizar el comportamiento a fatiga de ligantes y mezclas bituminosas. Por ello, en esta sección se recogen las primeras experiencias documentadas, a conocimiento del autor, en que se puso en práctica esta metodología de ensayo y se resumen algunos estudios que la emplearon para caracterizar el comportamiento a fatiga de materiales bituminosos.

Los parámetros que caracterizan el comportamiento viscoelástico de los materiales son, como se ha comentado en el apartado 2.4, el módulo complejo (G^*), el ángulo de desfase (δ), el módulo elástico ($G^{'}$) y el módulo viscoso ($G^{''}$). Todos ellos se definen bajo condiciones viscoelásticas lineales y por ello es importante saber cuál es el rango de comportamiento lineal de estos materiales tanto en niveles de deformación como en niveles de tensión.

Con este objetivo, se introdujeron a mediados de los 80 los ensayos cíclicos de amplitud de deformación creciente (barridos de deformaciones o *strain sweep*) para caracterizar las propiedades viscoelásticas de los polímeros [25, 59, 11]. Estos ensayos se emplean para determinar la denominada región viscoelástica lineal (*Linear Viscoelastic* o *LVE region*) de un material. Para ello se somete el material a un ensayo cíclico de amplitud de deformación creciente y se mide la deformación máxima hasta la cual el módulo elástico $G^{'}$ se mantiene constante. Esta deformación recibe el nombre de deformación límite y delimita la región en la cual el comportamiento viscoelástico del material es lineal, figura 2.27.

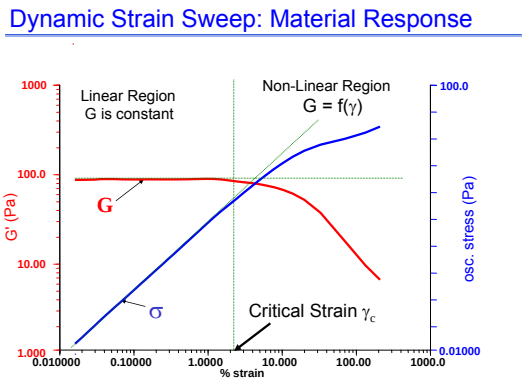


Figura 2.27: Evolución del módulo complejo y la tensión en un ensayo de barrido de deformaciones [55]

Esta técnica se empleó en ligantes bituminosos durante el desarrollo del SHRP a finales de los 80 y principios de los 90. Realizando ensayos de barridos de deformaciones en el DSR a diferentes tipos de ligantes y determinando sus respectivas deformaciones y tensiones límite se obtuvo que éstas eran funciones del módulo complejo que satisfacían las ecuaciones 2.50 y 2.51 [43, 9]:

$$\gamma = 12{,}0/(G^*)^{0{,}29} \tag{2.50}$$
$$\tau = 0{,}12/(G^*)^{0{,}71}, \tag{2.51}$$

donde γ y τ son la deformación y tensión de corte, y G^* el módulo complejo.

Varios autores han destacado a lo largo de los años la importancia de la determinación del rango de linealidad viscoelástica de los ligantes. En particular desde la introducción de los ligantes modificados con polímeros por presentar éstos unos rangos de linealidad especialmente reducidos, es decir, su comportamiento se separa de la linealidad a niveles de deformación o tensión menores a los de los ligantes convencionales [19, 9, 12, 6, 7, 5].

Hasta la fecha, el barrido de deformaciones se ha empleado como un método de obtención de las propiedades viscoelásticas de los materiales y de los niveles de deformaciones y/o tensiones bajo las cuales se comportan linealmente. Recientemente Johnson [31, 29] ha aplicado este concepto a la caracterización del comportamiento a fatiga de los ligantes bituminosos. Denominado Barrido de Amplitud Lineal (*Linear Amplitude Sweep*, LAS), consiste en someter una probeta de ligante bituminoso a un ensayo cíclico de torsión (mediante el DSR) en el que la amplitud de deformación aumenta un valor fijo cada cierto número de ciclos. En la figura 2.28 se muestra un ejemplo de la señal impuesta en el ensayo.

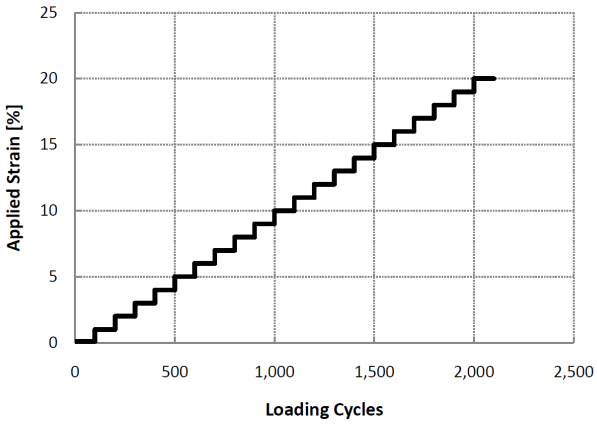


Figura 2.28: Señal de deformación impuesta en el DSR durante el método de ensayo LAS [31]

Con los resultados obtenidos en estos ensayos y aplicando un modelo viscoelástico de daño (ver sección 2.5) se obtuvo el valor de la variable de daño asociada a la degradación del módulo complejo G^*. Ésta a su vez sirvió para obtener los parámetros que definen la expresión que relaciona el número de ciclos hasta fallo con la deformación impuesta en el ensayo. Una de las conclusiones más importantes del estudio fue la buena correlación hallada entre las leyes de fatiga obtenidas mediante el modelo viscoelástico de daño de los ensayos LAS y los ensayos cíclicos a deformación constante (*time sweep*).

2.8. Tixotropía

Como se menciona en la sección 2.4, los betunes presentan una dualidad de comportamiento referente a su estado, sólido y fluido. Por ello se hace necesario introducir algunos comportamientos que si bien son característicos de los fluidos, se han manifestado en ensayos realizados a ligantes bituminosos durante el desarrollo de esta tesis doctoral. Tal es el caso de la tixotropía.

La tixotropía es un efecto reológico muy conocido en el campo de estudio de los fluidos coloidales. Los cambios microestructurales que propician su aparición son muy complejos y, a día de hoy, no están del todo resueltos, hasta el punto de que existe cierta controversia en la propia definición del proceso. La más aceptada dentro de la comunidad científica define la tixotropía como el descenso continuo de la viscosidad con el tiempo cuando un flujo se aplica a una muestra que ha estado previamente en reposo, y la recuperación de la viscosidad con el tiempo cuando el flujo se detiene [38, 39]. Independientemente de la definición, la tixotropía se caracteriza por tres conceptos básicos: el fluido presenta una viscosidad, esta viscosidad decrece con el tiempo cuando un flujo es inducido y el efecto es reversible cuando el flujo disminuye o se detiene por completo.

La dependencia en el tiempo de la tixotropía hace que en ocasiones sea confundida con la viscoelasticidad. Esto es debido a que los modelos viscoelásticos no lineales para polímeros fueron derivados de modelos lineales empleando un proceso similar al empleado para materiales tixotrópicos. Lo que ocurre en realidad es que los materiales tixotrópicos pueden ser o no viscoelásticos. El ensayo definitivo que discierne entre tixotropía y viscoelasticidad consiste en un descenso brusco de la amplitud de deformación cíclica. En dicho ensayo, se registra la evolución de la tensión, σ, cuando la amplitud de deformación se reduce, $\dot{\gamma}_i \rightarrow \dot{\gamma}_e$, figura 2.29a. Los materiales viscoelásticos, independientemente de estar en el rango lineal o no lineal, reaccionan a tal cambio con un descenso monotónico de la tensión hasta un nuevo valor de estabilización, figura 2.29b. Sin embargo, un material tixotrópico inelástico reacciona con un descenso abrupto de la tensión y gradualmente ésta aumenta hasta un nuevo valor de estabilización, figura 2.29c. El comportamiento más general es una combinación de los dos, caída instantánea seguida de una relajación relativamente rápida y finalmente un incremento gradual de la tensión hasta alcanzar el nuevo estado estacionario, figura 2.29d.

Por lo tanto, la mejor herramienta para caracterizar el comportamiento tixotrópico de un material es un ensayo cíclico en el cual la amplitud de deformación cambie de manera escalonada, figura 2.30. Es conveniente realizar estos ensayos tanto aumentando la amplitud de deformación como disminuyéndola para mostrar la reversibilidad del proceso, que como se ha mencionado anteriormente, es una de las características fundamentales de los materiales tixotrópicos [39].

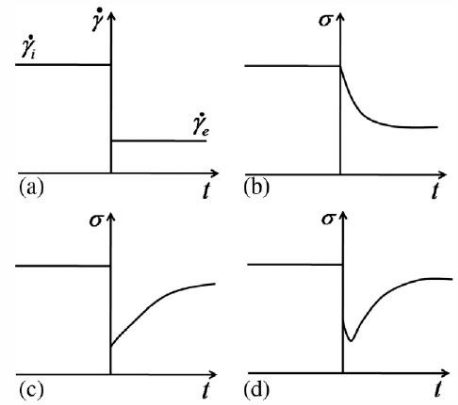


Figura 2.29: Varios tipos de respuesta a una reducción instantánea de la amplitud de deformación cíclica (a): b) Material viscoelástico; c) Material tixotrópico inelástico; d) Caso general, [39].

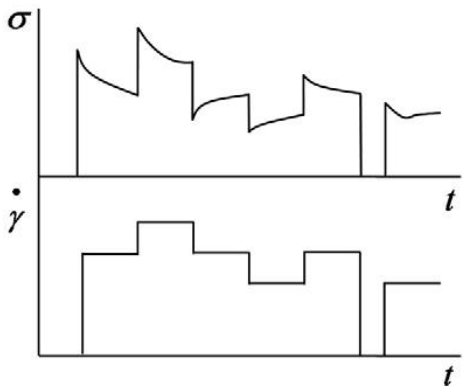


Figura 2.30: Respuesta de un material tixotrópico a una historia de amplitud de deformación compleja [39].

Capítulo 3

Metodología experimental

En este capítulo se justifican y describen los métodos y maquinaria de ensayo empleados, las características de los materiales ensayados y la planificación de ensayos llevada a cabo.

El objetivo principal de esta tesis doctoral consistía en desarrollar un procedimiento para evaluar el comportamiento a fatiga de ligantes bituminosos, exento de los inconvenientes que afectaban a los procedimientos existentes en el momento de inicio de la misma. Este nuevo procedimiento debía cumplir con dos requisitos fundamentales: rapidez y sencillez.

Para cumplir con el primero de ellos se optó por la modalidad de ensayo conocida como barrido de deformaciones (*strain sweep*) que será descrita en la sección 3.2. La validez de este método para evaluar el comportamiento a fatiga había sido demostrada por estudios anteriores, como se ha mostrado en el capítulo anterior.

Para satisfacer el segundo de los requisitos, se escogió la configuración de carga uniaxial de tracción-compresión. Hasta la fecha, la mayoría de los estudios realizados en ligantes bituminosos se realizaban en ensayos de torsión, debido a la conveniencia de emplear el reómetro de corte dinámico (DSR). Sin embargo, la implementación de un ensayo de corte de las mismas características en probetas de mezcla bituminosa no es sencilla. Esto es debido a que el reómetro de corte fue diseñado para evaluar la viscosidad de fluidos, y presenta problemas con materiales de viscosidad elevada [16] como es el caso de las mezclas bituminosas, o incluso de los ligantes bituminosos a bajas temperaturas. Por lo tanto, implementar un ensayo uniaxial de tracción-compresión permitiría realizar ensayos del mismo tipo en ligantes, másticos y mezclas bituminosas.

Una vez definido el tipo de ensayo, el siguiente paso consistió en definir la geometría a emplear. Por la constitución de los ligantes, fluidos a altas temperaturas y sólidos de alta viscosidad a temperatura ambiente, la forma cilíndrica presentaba ventajas obvias de fabricación, permitiría una fabricación simple por vertido en un recipiente cilíndrico y un fácil desmolde. Además, este tipo de geo-

metría ayudaría a una distribución uniforme de las tensiones en el seno de la probeta.

El siguiente paso consistió en poner en práctica el ensayo, para poner de manifiesto inconvenientes o efectos no previstos. Para ello, en primer lugar se analizaron diferentes dimensiones de probeta, para acabar optando por las descritas en la sección 3.1, figura 3.1. A continuación era necesario, constatar que el ensayo era repetible y sensible a las diferentes variables que podrían ser estudiadas a lo largo de la tesis. La planificación de ensayos seguida durante este proceso se recoge en la sección 3.7.1. Con esta parte del estudio finalizada, se dio por concluido el proceso de calibración de la nueva metodología de ensayo.

Una vez validado el nuevo procedimiento de ensayo, se aplicó a diferentes ligantes bituminosos, con el objetivo de analizar los diferentes comportamientos de ligantes de diferente dureza, sección 3.7.3. Al tratarse de un nuevo procedimiento de ensayo, en particular el barrido de deformaciones, se estudió el comportamiento a fatiga de estos mismos ligantes mediante el procedimiento clásico, consistente en obtener la ley de fatiga de los ligantes mediante ensayos de barrido de tiempo 3.7.2.

Cuando se compararon los resultados de los barridos de deformaciones y los barridos de tiempo, todo parecía indicar que en los niveles más bajos de deformación no se producía un daño irreversible a las muestras. Por ello se diseño un nuevo esquema de ensayo en el cual se alternaban bloques de ciclos a alta y baja amplitud de deformación, para más detalles ver la sección 3.3. Con este tipo de ensayo se pretendía constatar que la disminución del módulo complejo de las muestras era recuperable, y así fue.

A la luz de este descubrimiento, como última etapa investigadora de esta tesis, se hacía necesario cuantificar como de importante sería este efecto de recuperación en la mezcla bituminosa. Para ello se implementó el procedimiento de ensayo descrito en la sección 3.3 en mezclas, empleando el montaje experimental del ensayo CTD (Cataluña Tracción Directa), desarrollado con anterioridad por el Laboratorio de Caminos de la Universitat Politècnica de Catalunya [8].

En las siguientes secciones se detallan las diferentes etapas del proceso de investigación, resumidas en esta sección.

3.1. Ensayo EBADE

El ensayo EBADE (Ensayo de BArrido de DEformaciones) es un ensayo cíclico uniaxial de tracción-compresión realizado a desplazamiento controlado. Este ensayo es aplicable a ligantes y a mezclas bituminosas, con diferentes montajes experimentales. La deformación impuesta a la probeta se controla mediante extensómetros o se calcula teniendo en cuenta la altura de ésta y el recorrido del pistón de la prensa. Para su aplicación en ligantes se emplea una probeta cilíndrica de 20 mm de diámetro y de $40 \pm 0{,}5$ mm de altura, figura 3.1, mientras que en su aplicación en mezclas se emplea una probeta prismática cuyas medidas

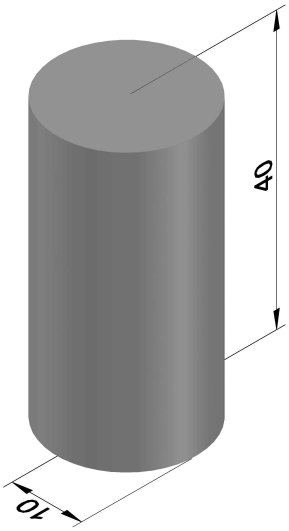


Figura 3.1: Dimensiones de las probetas cilíndricas empleadas en el ensayo EBADE para ligantes (unidades en milímetros).

son aproximadamente 50 mm x 50 mm x 60 mm, con dos entallas inducidas en su sección central, figura 3.2.

Para la fabricación de las probetas de ligante se calienta el ligante en estufa hasta 120-130°C durante 2 horas. Posteriormente se vierte el ligante en un molde cilíndrico de 40 mm de alto y 20 mm de diámetro. Se forra el interior del molde cilíndrico con papel antiadhesivo para facilitar el desmolde y se excede con holgura la altura deseada de la probeta final. Una vez la probeta adquiere la temperatura deseada, se retira la parte superior del papel adhesivo que supera los 40 mm y mediante una espátula caliente se enrasa la probeta a la altura del molde, figura 3.3.

Las probetas son adheridas a la máquina de ensayo mediante un adhesivo de cianocrilato. Según las especificaciones del fabricante el adhesivo endurece en menos de 15 minutos, aunque por precaución se estableció un periodo de 1 hora de secado antes de comenzar el ensayo. Este tipo de adhesivo presenta un módulo elástico muy superior al del ligante y por lo tanto se puede suponer que su deformación es despreciable, figura 3.4.

Para la implementación del ensayo CTD se fabrican probetas cilíndricas tipo Marshall de mezcla bituminosa. La granulometría de cada probeta se controla por separado, y se realiza la envuelta con los áridos a una temperatura de 180°C y el ligante a la temperatura especificada por el fabricante (típicamente alrededor de 150°C). El filler se añade una vez realizada la envuelta del los áridos por el betún para evitar que el mástico bituminosos adquiera viscosidades demasia-

Figura 3.2: Montaje experimental del ensayo EBADE en mezclas, adaptado del ensayo CTD (Cataluña Tracción Directa).

Figura 3.3: Probeta de betún en su molde antes de ser enrasada.

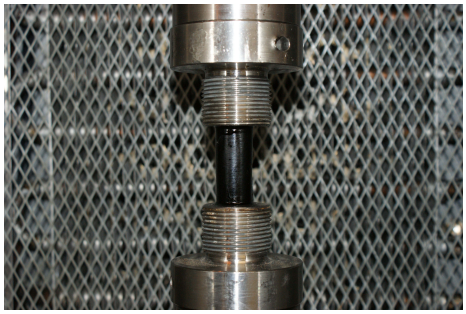


Figura 3.4: Probeta de betún adherida a la máquina de ensayo lista para ser ensayada.

do elevadas para poder mojar los áridos. Todo el proceso se realiza dentro de un cazo sobre una plancha metálica que cumple el objetivo de mantener la temperatura de mezclado. Cuando se ha finalizado el proceso de mezclado, se vierte la mezcla en un molde cilíndrico y se compacta por impacto a 75 golpes por cara. 24 horas después de ser fabricadas las probetas son desmoldadas, obteniéndose así probetas cilíndricas de 101.6 mm de diámetro y aproximadamente 65 mm de altura. Mediante el uso de una sierra especial, se cortan las probetas de forma que se obtienen prismas de 50 mm x 50 mm x 60 mm aproximadamente, y se generan dos entallas de aproximadamente 5 mm de profundidad y 5 mm de anchura en dos de las caras laterales de la probeta para facilitar su fractura por la sección media. Por último, estas probetas se adhieren a unas placas metálicas, especialmente diseñadas para poder ser atornilladas a la prensa de ensayo, mediante un mortero a base de resina epoxy. Las probetas están listas para ser ensayadas 48 horas después de ser pegadas.

3.2. Ensayo de barrido de deformaciones ascendente

El ensayo de barrido de deformaciones ascendente (ensayo EBADE) consiste en aplicar un cierto número de ciclos a una deformación constante imponiendo un desplazamiento vertical senoidal a una frecuencia y amplitud dada. Una vez se alcanza el número de ciclos programado, se aumenta la amplitud del desplazamiento y se aplican el mismo número de ciclos. De esta forma cada cierto número de ciclos la deformación aumenta un valor determinado que en este caso se mantuvo constante. Existe la posibilidad de introducir un periodo de reposo entre escalones de deformación. En las figuras 3.5 y 3.6 se muestra un ejemplo de las señales impuestas durante los ensayos con y sin reposo.

Durante el procedimiento de calibración se emplearon duraciones por escalón distintas; 3000, 5000 y 10.000 ciclos por escalón. El primer escalón se realizó con una amplitud de desplazamiento de 30 micras, y ésta se fue incrementando escalón a escalón en 30 micras. Debido a que la maquinaria controla el ensayo por desplazamiento del pistón, todas las probetas de ligante fueron comprimidas a un espesor de 39.5 mm, con objeto de asegurar la correcta adhesión y evitar pequeñas diferencias entre las deformaciones aplicadas a probetas de diferente altura. Una vez aplicada la compresión se estableció un periodo de 1 hora para garantizar el secado del adhesivo y relajar la tensiones que se pudieran haber generado en la probeta. En la tabla 3.1 se muestran las deformaciones que corresponden a cada escalón de deformación para los diez primeros escalones del ensayo EBADE.

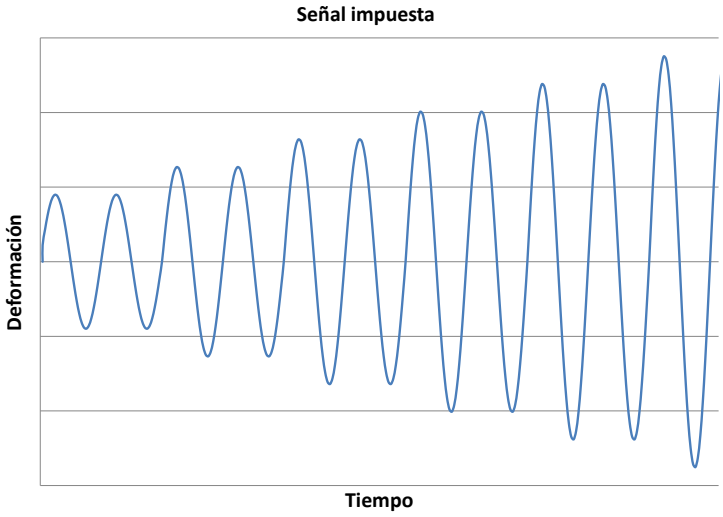


Figura 3.5: Ejemplo de la señal impuesta durante un ensayo EBADE con dos ciclos por escalón de deformación.

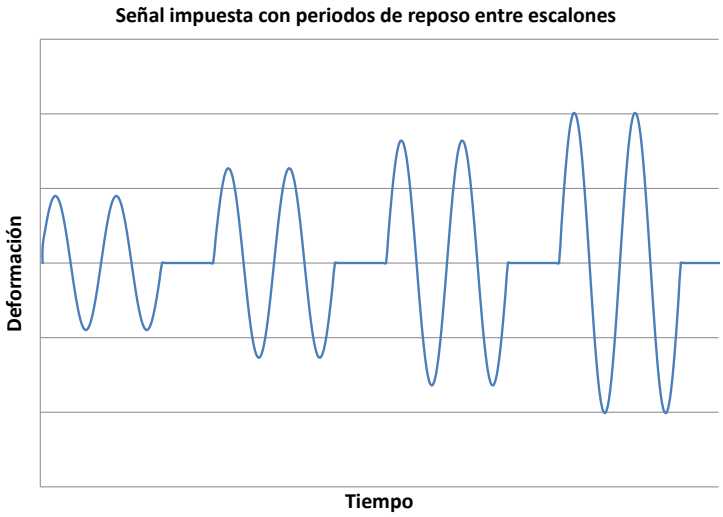


Figura 3.6: Ejemplo de la señal impuesta durante un ensayo EBADE con dos ciclos por escalón de deformación y periodos de reposo entre escalones.

Escalón	Deformación (ligantes)	Deformación en % (ligantes)	Deformación (mezclas)
1	$7.6{\cdot}10^{-4}$	0.08	$2.5{\cdot}10^{-5}$
2	$1.5{\cdot}10^{-3}$	0.15	$5.0{\cdot}10^{-5}$
3	$2.3{\cdot}10^{-3}$	0,23	$7.5{\cdot}10^{-5}$
4	$3.0{\cdot}10^{-3}$	0.30	$1.00{\cdot}10^{-4}$
5	$3.8{\cdot}10^{-3}$	0.38	$1.25{\cdot}10^{-4}$
6	$4.6{\cdot}10^{-3}$	0.46	$1.50{\cdot}10^{-4}$
7	$5.3{\cdot}10^{-3}$	0.53	$1.75{\cdot}10^{-4}$
8	$6.1{\cdot}10^{-3}$	0.61	$2.00{\cdot}10^{-4}$
9	$6.8{\cdot}10^{-3}$	0.68	$2.25{\cdot}10^{-4}$
10	$7.6{\cdot}10^{-3}$	0.76	$2.50{\cdot}10^{-4}$

Tabla 3.1: Amplitud de deformación correspondiente a cada escalón de deformación del ensayo EBADE.

La adquisición de datos se realiza registrando 50 puntos de carga y desplazamiento a lo largo de 1 ciclo cada 100 ciclos. De esta forma se puede controlar la evolución de la señal resultante de carga y la elipse que se forma en el plano carga-desplazamiento. De cada ciclo se obtiene la carga y el desplazamiento máximo, y teniendo en cuenta la altura y sección de la probeta se obtiene la deformación y tensión máximas, ecuaciónes 3.1 y 3.2. Con estos dos valores se puede obtener el valor del módulo complejo como la pendiente del semieje mayor de la elipse tensión-deformación, figura 3.7.

$$\sigma_{max} = \frac{F}{S} \tag{3.1}$$

$$\varepsilon_{max} = \frac{D}{h} \tag{3.2}$$

$$E^* = \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon_{max}}, \tag{3.3}$$

donde F es la fuerza máxima registrada por la célula de carga, S es la sección transversal de la probeta, D es el desplazamiento máximo, h es la altura de la probeta y E^* es el módulo complejo.

Monitorizando ciclo a ciclo el valor del módulo complejo se pretende evaluar la evolución del daño inducido a la probeta por los ciclos aplicados y el incremento de la deformación. También es posible obtener el ángulo de fase en cada ciclo, ya que el software de adquisición de datos registra el instante en que se realiza cada medición, por lo tanto éste se puede obtener calculando la diferencia temporal entre el máximo de deformación y el máximo de tensión y teniendo en

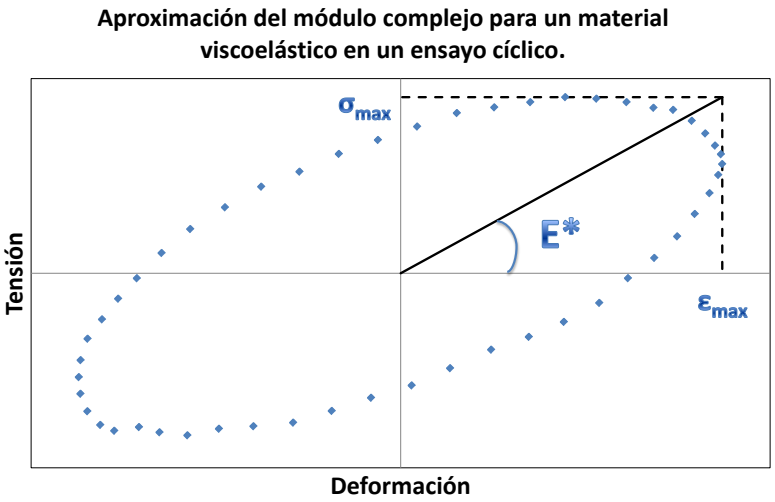


Figura 3.7: Cálculo aproximado del módulo complejo como la inclinación de la elipse tensión-deformación en un ensayo cíclico.

cuenta la frecuencia de ensayo, ecuación 3.4.

$$\delta = (t_{\varepsilon_{max}} - t_{\sigma_{max}})\frac{2\pi}{f}, \tag{3.4}$$

donde δ es el ángulo de fase, $t_{\sigma_{max}}$ y $t_{\varepsilon_{max}}$ son los tiempos para la deformación y tensión máximas respectivamente y f la frecuencia de ensayo.

En las figuras 3.8 y 3.9 se muestra un ejemplo de las gráficas de tensión y módulo obtenidas en un ensayo EBADE. Los niveles de deformación que no causan cambios reológicos o deterioro del ligante se caracterizan por mantener constante el valor de la tensión y por lo tanto el del módulo, mientras que cuando se alcanzan niveles de deformación superiores al límite viscoelástico lineal se observa una disminución del módulo con el número de ciclos dentro de un mismo escalón.

El área encerrada por la elipse que se forma en el plano tensión-deformación durante cada ciclo de carga aplicado es proporcional a la *Densidad de Energía Disipada* en cada ciclo debido al comportamiento viscoelástico del material. Para el cálculo de esta área se emplea la *Fórmula Determinante de Gauss*, ecuación 3.5. Esta expresión permite calcular el área del polígono cerrado por una serie de n puntos en el plano xy.

$$S = \frac{1}{2}|(x_1 \cdot y_2 + ... + x_n \cdot y_1) - (y_1 \cdot x_2 + ... + y_n \cdot x_1)|, \tag{3.5}$$

donde S es el área del polígono en unidades $[x] \cdot [y]$ y x_i, y_i son las coordenadas de los n puntos ordenados horaria o antihorariamente por proximidad.

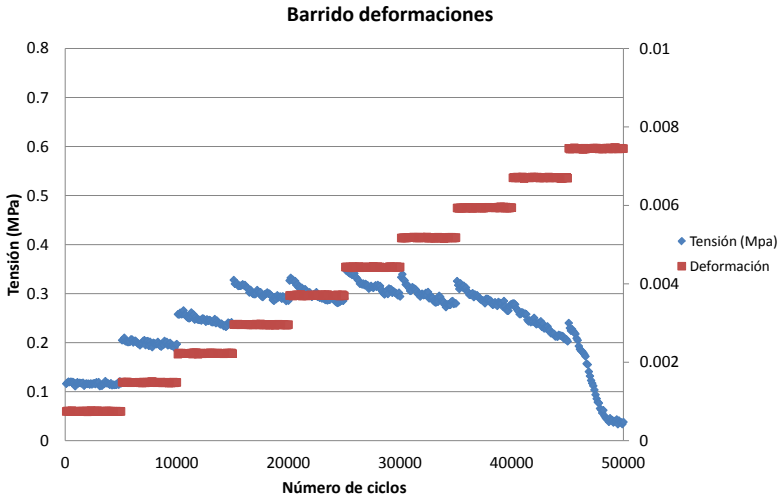


Figura 3.8: Ejemplo de gráfica de evolución de la tensión registrada con el número de ciclos en el ensayo EBADE.

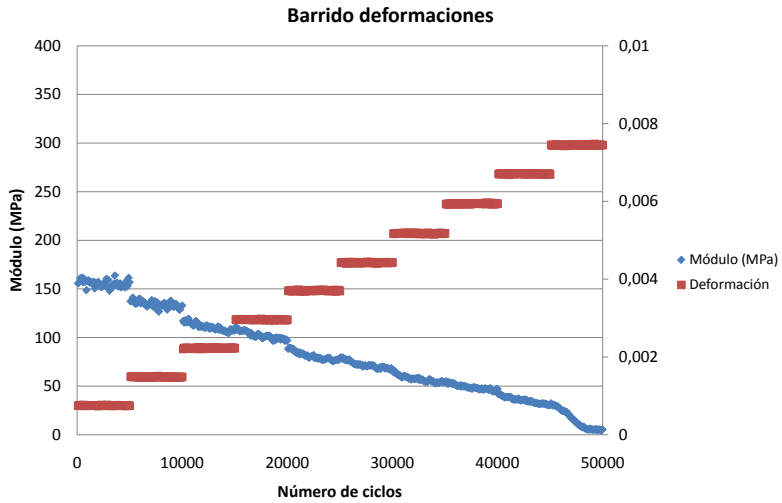


Figura 3.9: Ejemplo de gráfica de evolución del módulo complejo con el número de ciclos en el ensayo EBADE.

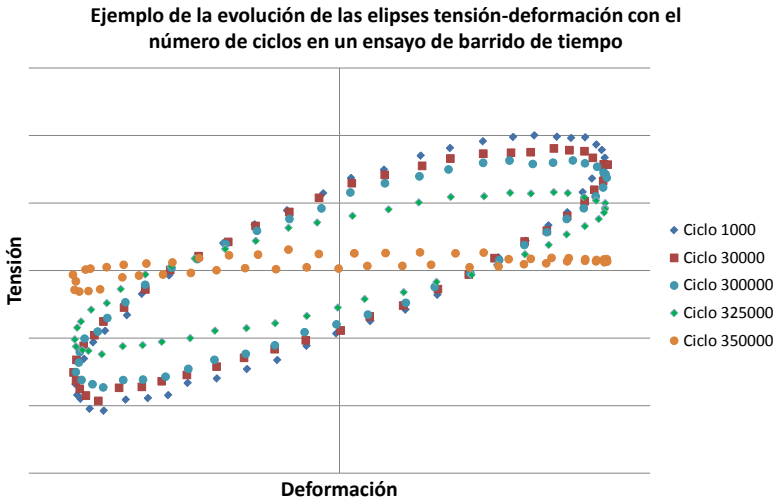


Figura 3.10: Ejemplo de la evolución de las elipses tensión-deformación con el número de ciclos en un ensayo de barrido de tiempo.

Finalmente, en el caso que nos ocupa, para obtener la Densidad de Energía Disipada, DED, en J/m^3 se emplea la ecuación 3.6:

$$DED = S \cdot \frac{g}{A \cdot h} \cdot 10^6, \tag{3.6}$$

donde S es el área del bucle en $kg \cdot mm$, g es la aceleración de la gravedad en m/s^2, A la sección transversal de la probeta en mm^2 y h la altura de la probeta en mm. Para convertir las unidades de DED de MPa a unidades del sistema internacional, J/m^3, es necesario multiplicar por un factor $1 \cdot 10^6$.

En ensayos a deformación constante esta magnitud disminuye a medida que el daño en el material aumenta, figura 3.10. Los niveles de deformación que no causan daño se caracterizan por mantener constante la densidad de energía disipada, DED. Por otro lado es mayor cuanto mayor es la deformación aplicada, obviamente el área de la elipse aumenta cuando aumenta la deformación hasta que se alcanza la deformación máxima que puede soportar el material y se produce la rotura, en cuyo momento la DED decrece de manera brusca, figura 3.11.

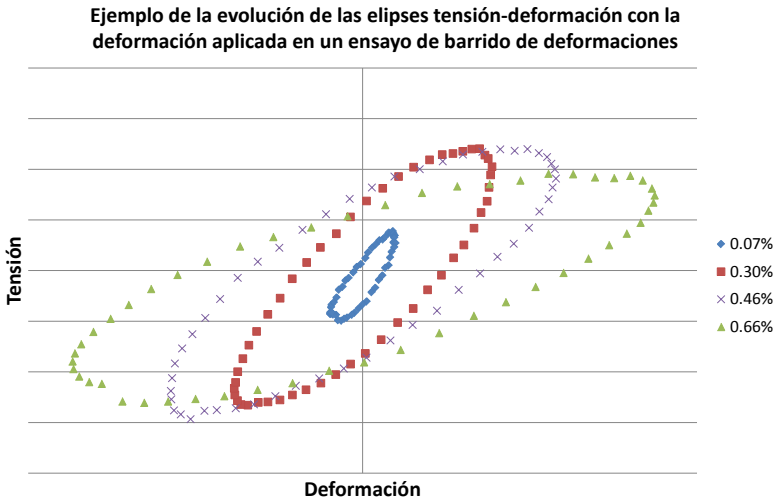


Figura 3.11: Ejemplo de la evolución de las elipses tensión-deformación con la deformación aplicada en un ensayo de barrido de deformaciones.

3.3. Ensayos de barrido de deformaciones alternativas

Debido a los resultados obtenidos, se diseñó un nuevo procedimiento de ensayo en el cual las amplitudes de deformación aplicadas a las probetas aumentaban y disminuían alternativamente. El objetivo de esta nueva configuración era demostrar que el descenso en el módulo complejo observado en los barridos de deformaciones ascendentes era parcial o totalmente recuperable.

Este procedimiento se puede dividir en bloques que se denominaron *triángulos* por la geometría que describen las amplitudes de deformación cuando se representan frente al número de ciclos. A su vez cada triángulo está compuesto de dos ramas, un rama ascendente en la cual la deformación aumenta cada 5,000 ciclos y una rama descendente en la cual la deformación disminuye cada 5,000 ciclos. En los ensayos realizados en mezclas bituminosas se introdujo un periodo de reposo de 30 minutos entre triángulo y triángulo. Un ejemplo de la señal de deformación impuesta durante este tipo de ensayo se muestra en la figura 3.12.

Con este tipo de ensayo se pretendió valorar la capacidad del material de recuperar su propiedades, en términos del módulo complejo y la densidad de energía disipada.

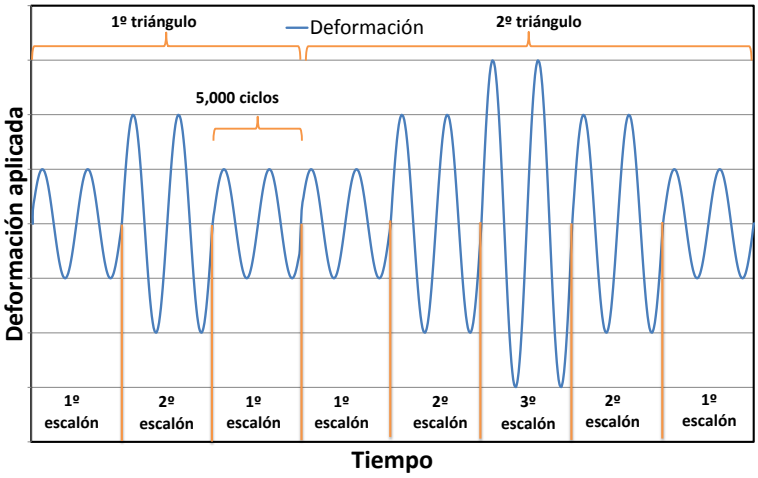


Figura 3.12: Ejemplo de la señal impuesta durante un ensayo de barrido de deformaciones alternativas con dos ciclos por escalón de deformación.

3.4. Ensayos de barrido de tiempo

Los ensayos de barrido de tiempo son ensayos de fatiga clásicos en los que la amplitud de desplazamiento o deformación se mantiene constante 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 realizan varios ensayos a diferentes amplitudes de deformación y se registra el número de ciclos hasta fallo. Como se ha explicado en el capítulo 1, el logaritmo de la deformación impuesta en función del logaritmo del número de ciclos se ajusta razonablemente bien a una recta que se denomina ley de fatiga. Si se supone que esta relación es válida para cualquier deformación impuesta, lo cual no tiene porque cumplirse necesariamente [46], es posible establecer el número de ciclos que puede soportar el material para una deformación dada.

El principal inconveniente de este tipo de ensayos es su larga duración y el elevado número de ensayos necesario para obtener una ley de fatiga con una buena correlación.

3.5. Ensayo de envejecimiento acelerado RTFOT

El ensayo de envejecimiento acelerado de ligantes RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*) se emplea para simular el envejecimiento que sufre el ligante durante la fabricación y extendido de la mezcla bituminosa en obra [3].

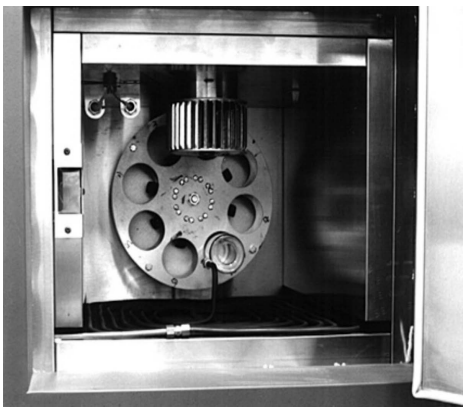


Figura 3.13: Imagen del horno rotatorio con inyección de aire empleado en el ensayo RTFOT.

El procedimiento de ensayo consiste en colocar muestras de ligante virgen en recipientes cilíndricos de cristal y colocarlos en marco rotatorio dentro de un horno a 163°C durante 85 minutos. Adicionalmente se inyecta aire a presión para acelerar el proceso de envejecimiento creando un entorno rico en oxígeno, figura 3.13.

Una vez finalizado el ensayo el ligante empleado se extrae de los cilindros de cristal y se almacena para una posterior caracterización mecánica. Este ensayo se aplicó para envejecer uno de los ligantes ensayados.

3.6. Maquinaria de ensayo

La máquina de ensayo empleada 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 desplazamiento del pistón permite realizar desplazamientos de 30 micras con precisiones de alrededor de 1 micra. La prensa está equipada con una cámara ambiental que permite controlar la temperatura en todo momento 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.

3.7. Planificación experimental

En este apartado se indexan y describen las diferentes fases experimentales que se han llevado a cabo en la realización de esta tesis doctoral.

Figura 3.14: Prensas dinámicas hidráulicas MTS empleadas en el ensayo.

3.7.1. Ensayos de calibración en ligantes

Esta parte del estudio ha consistido en poner a punto el procedimiento de ensayo EBADE. Para ello se han realizado ensayos con diferentes ligantes, diferentes frecuencias, diferente número de ciclos por escalón de deformación y con y sin periodos de reposo. A continuación se detallan los diferentes estudios llevados a cabo.

Repetibilidad

En primer lugar, para garantizar que el procedimiento EBADE era capaz de entregar resultados similares para dos probetas similares preparadas con el mismo ligante, se realizó un estudio de repetibilidad donde se empleó un ligante B 60/70 de referencia para fabricar una serie de probetas que fueron sometidas al mismo protocolo de ensayo:

- Frecuencia: 10 Hz.
- Temperatura de ensayo: 10ºC.
- Incremento de amplitud de desplazamiento: 30 μm.
- Ciclos por escalón: 3,000.
- Periodo de reposo de 1 minuto entre escalones.
- Ligante: B 60/70.

Siguiendo este protocolo de ensayo el procedimiento EBADE tuvo una duración siempre inferior a las 3 horas, 1 hora de secado del adhesivo más 2 horas en el caso en que la probeta no rompiera antes de alcanzarse el máximo desplazamiento programado en el software. Se realizaron un total de 10 ensayos.

Sensibilidad a la frecuencia de ensayo

Para analizar la influencia de la frecuencia de ensayo se realizaron ensayos a diferentes frecuencias con probetas del ligante B 60/70 de referencia empleado en el estudio de repetibilidad. A continuación se detalla el protocolo de ensayo empleado:

- Frecuencias: 1, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 Hz.
- Temperatura de ensayo: 10ºC.
- Incremento de amplitud de desplazamiento: 30 μm.
- Ciclos por escalón: 3,000.
- Periodo de reposo de 1 minuto entre escalones.
- Ligante: B 60/70.

Debido a los buenos resultados obtenidos en el estudio de repetibilidad, en este estudio se empleó una sola probeta por cada frecuencia de ensayo.

Sensibilidad al tipo de ligante

Para la realización de este estudio se emplearon tres ligantes de tres penetraciones distintas y un ligante modificado. El protocolo de ensayo empleado durante este estudio fue el siguiente:

- Frecuencia: 10 Hz.
- Temperatura de ensayo: 10ºC.
- Incremento de amplitud de desplazamiento: 30 μm.
- Ciclos por escalón: 3,000.
- Periodo de reposo de 1 minuto entre escalones.
- Ligante: B 13/22 B 40/50, B 60/70 y BM3c.

Se realizaron un total de tres ensayos por ligante.

Sensibilidad al número de ciclos por escalón de deformación

Como última comprobación sobre la sensibilidad del ensayo al protocolo escogido se estudió la influencia en los resultados de variar el número de ciclos por escalón de deformación aplicada. Como en los anteriores apartados se muestra el protocolo de ensayo llevado a cabo:

- Frecuencia: 10 Hz.

- Temperatura de ensayo: 10ºC.
- Incremento de amplitud de desplazamiento: 30 μm.
- Ciclos por escalón: 3,000, 5,000 y 10,000.
- Con y sin periodo de reposo de 1 minuto entre escalones.
- Ligante: B 60/70.

3.7.2. Ensayos de barrido de tiempo en ligantes

Con el objetivo de obtener las leyes de fatiga de cuatro ligantes bituminosos se aplicaron los ensayos de barrido de tiempo. El protocolo de ensayo llevado a cabo se muestra a continuación:

- Frecuencia: 10 Hz.
- Temperatura de ensayo: 10ºC.
- Amplitud de desplazamiento constante: 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180 μm.
- Ligantes: B 13/22, B 40/50, B 60/70 y B 60/70 RTFOT.

3.7.3. Ensayos de barrido de deformaciones ascendentes en ligantes

Una vez obtenidas las leyes de fatiga de los ligantes, se procedió a aplicar los ensayos de barrido de deformaciones ascendentes con el objetivo de hallar similitudes entre ambos procedimientos de ensayo, y así poder caracterizar el comportamiento a fatiga empleando el procedimiento EBADE. El protocolo de ensayo fue el siguiente:

- Frecuencia: 10 Hz.
- Temperatura de ensayo: 10ºC.
- Incremento de amplitud de desplazamiento: 30 μm.
- Ciclos por escalón: 5,000.
- Ligantes: B 13/22, B 40/50, B 60/70 y B 60/70 RTFOT.

Se realizaron al menos 3 ensayos por ligante.

3.7.4. Ensayos de barrido de deformaciones alternativas en ligantes

A la vista de los resultados obtenidos en las fase anterior, se hizo necesario aplicar los ensayos de barrido de deformaciones alternativas para determinar la capacidad del material de recuperar sus propiedades, módulo complejo y densidad de energía disipada. A continuación se muestra el protocolo de ensayo:

- Frecuencia: 10 Hz.
- Temperatura de ensayo: 10ºC.
- Incremento y decremento de amplitud de desplazamiento: 30 μm.
- Ciclos por escalón: 5,000.
- Ligantes: B 13/22, B 40/50, B 60/70 y B 60/70 RTFOT.

3.7.5. Ensayos de barrido de deformaciones alternativas en mezclas

Por último, para comprobar que el comportamiento observado en los ensayos de barrido de deformaciones alternativas aplicados a los ligantes se manifiesta en las mezclas bituminosas, se aplicó este procedimiento de ensayo a mezclas fabricadas con estos ligantes. El protocolo de ensayo se describe a continuación:

- Frecuencia: 10 Hz.
- Temperatura de ensayo: 20ºC.
- Incremento y decremento de amplitud de deformación: $2{,}5 \cdot 10^{-5}$.
- Ciclos por escalón: 5,000.
- Mezclas: AC16 S B 13/22 y AC16 S B 60/70.

Los ensayos realizados en mezclas se llevaron a cabo a 20ºC, 10ºC por encima de la temperatura a la cual se realizaron los ensayos en ligantes. Este cambio de temperatura se realizó para garantizar un comportamiento dúctil de las mezclas y poder observar el comportamiento viscoelástico de éstas.

Capítulo 4

Resultados

En este apartado se describen y analizan los resultados obtenidos en los ensayos llevados a cabo a lo largo de esta tesis. Como se ha descrito en la primera sección del capítulo anterior, la mayor parte del proyecto de investigación se basó en analizar el comportamiento a fatiga de los ligantes bituminosos mediante un ensayo uniaxial de tracción-compresión aplicando barridos de deformaciones.

En primer lugar se presentan los resultados obtenidos en los ensayos realizados para calibrar el nuevo procedimiento de ensayo en ligantes, sección 4.1.1. Estos resultados sirvieron para constatar la aplicabilidad del procedimiento de ensayo y para determinar las condiciones de ensayo finales que se emplearían en el resto del estudio.

A continuación se muestran y discuten los resultados obtenidos en los ensayos de barridos de tiempo, sección 4.1.2, realizados para obtener las leyes de fatiga de los ligantes. En el siguiente apartado se presentan los resultados de los ensayos de barridos de deformaciones ascendentes, sección 4.1.3, para continuar en la siguiente sección con la comparativa entre ambos tipos de ensayos, sección 4.1.4.

La comparación entre estos resultados puso de manifiesto la posibilidad de que los ligantes no estuvieran experimentando daño irreversible en los primeros niveles de amplitud de deformación. Como consecuencia de este hecho se diseñó el ensayo de barrido de deformaciones alternativas, descrito en el capítulo anterior, para analizar en profundidad este efecto. Los resultados obtenidos en estos ensayos, sección 4.1.5, confirmaron que la mayor parte de la reducción del módulo complejo es debida a efectos no lineales (tixotropía) y no a daño irreversible.

Dada la diferencia de comportamiento entre ligantes y mezclas, se hacía necesario comprobar si este tipo de comportamiento se daba también en mezclas bituminosas. Por ello en el último apartado se muestran y discuten los resultados obtenidos en este tipo de ensayos en su aplicación a mezclas bituminosas, sección 4.2.

Cada una de estas partes del proyecto de investigación ha sido incluida en diferentes artículos publicados en revistas indexadas con factor de impacto. Cada uno de estos artículos se adjuntan en los anejos de esta tesis doctoral.

4.1. Ligantes

Los resultados de los ensayos realizados en ligantes se dividen en cinco secciones. Las cuatro primeras corresponden a los ensayos planificados desde un principio para evaluar el comportamiento a fatiga de los ligantes mediante el barrido de deformaciones, y son los siguientes: los ensayos de calibración del nuevo método, los ensayos de barrido de tiempo, los ensayos de barrido de deformaciones y la comparativa entre estos dos últimos. Como consecuencia de los resultados obtenidos en esta primera fase del estudio, se introdujeron los subsiguientes apartados: los ensayos de barrido de deformaciones alternativas en ligantes y en mezclas. Todos los ensayos realizados en ligantes se llevaron a cabo a 10ºC de temperatura.

4.1.1. Calibración

Con el objeto de calibrar y validar el procedimiento de ensayo EBADE en su modalidad para ligantes bituminosos se analizó su repetibilidad, su sensibilidad a la frecuencia de ensayo y su sensibilidad al tipo de ligante.

Repetibilidad

Para analizar la repetibilidad del procedimiento EBADE aplicado a probetas cilíndricas en un ensayo cíclico uniaxial de tracción-compresión, se fabricaron un total de 8 probetas, figura 3.3, de un ligante B 60/70 empleado como ligante de referencia, tabla 4.1. De los ocho ensayos realizados seis finalizaron satisfactoriamente mientras que dos de ellos fueron interrumpidos por incidencias técnicas relacionadas con la maquinaria de ensayo.

Parámetro	Unidades	B 60/70
Penetración (25ºC; 100g; 5s)	0.1 mm	64
Índice de penetración	-	-0.2
Anillo y bola	ºC	51.7
Fragilidad Fraass	ºC	-17
Ductilidad a 25ºC	Cm	>100
Viscosidad dinámica a 60ºC	Pa·s	367
Viscosidad dinámica a 135ºC	Pa·s	0.56
Residuo después de RTFOT		
Pérdida de masa	%	0.5
Penetración (25ºC; 100g; 5s)	% p.o.	32
Aumento anillo y bola	ºC	9.6
Ductilidad a 25ºC	Cm	50

Tabla 4.1: Características del ligante B 60/70.

En las figuras 4.1, 4.2 y 4.3, se ha representado la evolución del módulo, tensión máxima y densidad de energía disipada con el número de ciclos para los seis ensayos realizados.

La figura 4.1 muestra como la mayor dispersión se da en los primero escalones de deformación, en especial los ensayos 3 y 4 fueron los que más se apartaron del comportamiento del resto. A medida que el ensayo avanza las diferencias en módulos se reducen significativamente.

Respecto a los resultados obtenidos para la tensión máxima por ciclo, se observa que las variaciones han sido menores.

En la figura 4.3 se observa como la densidad de energía disipada por ciclo ha sido la variable que menor dispersión ha mostrado entre ensayos.

En la tabla 4.2 se han tabulado los valores numéricos para una serie de parámetros calculados durante los ensayos EBADE, con el fin de evaluar la dispersión que muestra cada uno de ellos. Los parámetros representados en la tabla 4.2 son: tensión máxima alcanzada durante el ensayo (σ_{max}), deformación a la cual se produce el fallo total (ε_F), número de ciclos hasta fallo (N_{Ciclos}), los módulos promedio durante los escalones primero y segundo ($E^*\,1^{er}$ y $E^*\,2^{do}$ respectivamente) y la densidad de energía disipada máxima durante el ensayo (DED_{max}). La deformación de fallo, ε_F, se ha definido como la deformación correspondiente al escalón en que la densidad de energía disipada disminuye por debajo del 50 % de la DED_{max}, y el número de ciclos hasta fallo, N_{Ciclos}, como

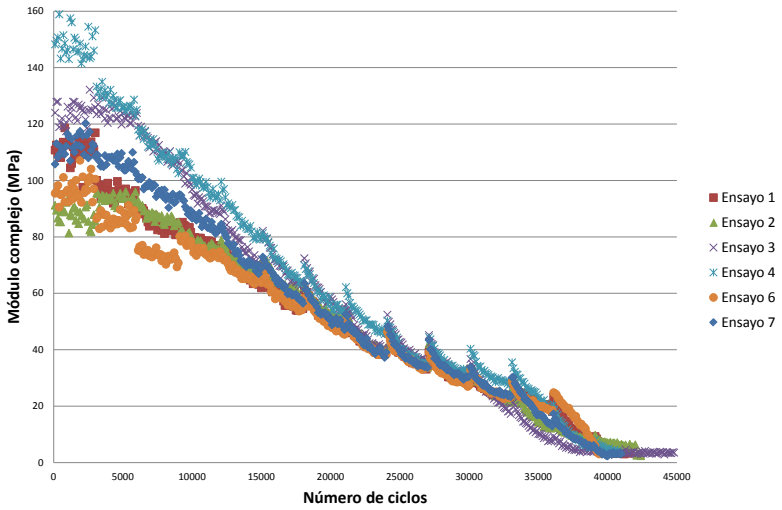


Figura 4.1: Representación del módulo complejo en cada ciclo para los seis ensayos considerados. Ensayos realizados a 10°C y 10 Hz.

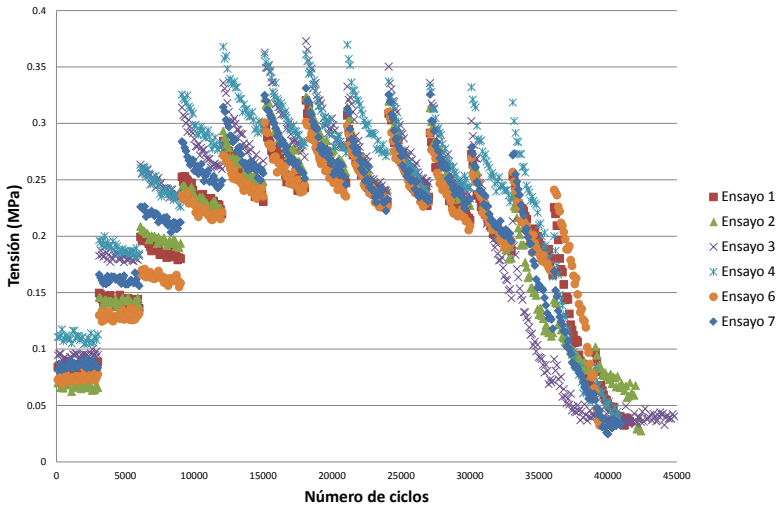


Figura 4.2: Representación de la tensión máxima en cada ciclo para los seis ensayos considerados. Ensayos realizados a 10°C y 10 Hz.

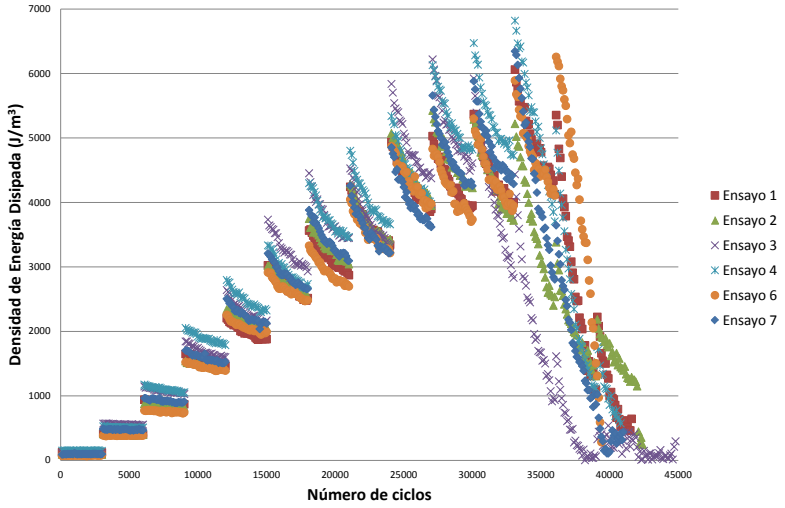


Figura 4.3: Representación de la densidad de energía disipada en cada ciclo para los seis ensayos considerados. Ensayos realizados a 10°C y 10 Hz.

el número de escalones hasta fallo multiplicado por 3,000, número de ciclos por escalón en este caso. El *Coeficiente de Variación*, C_V, es la desviación estándar, ecuación 4.1 en tanto por ciento respecto al valor promedio, ecuación 4.2 [26].

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \tag{4.1}$$

$$C_V = \frac{\sigma}{\bar{X}} \cdot 100, \tag{4.2}$$

donde σ es la desviación estándar, X_i son los valores muestrales, $\bar{X}$ la media, n el número de valores muestrales y C_V el coeficiente de variación en tanto por ciento.

De los parámetros analizados el que presentó la menor dispersión, con un coeficiente de variación del 6,7 % fue la densidad de energía disipada máxima. De la inspección de la figura 4.3 se desprende la misma conclusión. Por su parte la tensión máxima registrada a lo largo del ensayo obtuvo un C_V de 7,2 %. La deformación de fallo y el número de ciclos hasta fallo obtuvieron C_V similares, alrededor del 10 %, lo cual es lógico ya que son dos parámetros relacionados entre sí. Los módulos promedio registrados en el primer y segundo escalón de deformación fueron los parámetros que mayor dispersión mostraron, 17,1 y 14,8 % respectivamente.

Ensayo	σ_{max} (MPa)	$\varepsilon_F(\%)$	N_{Ciclos}	E^* 1er (MPa)	E^* 2do (MPa)	DED_{max} (J/m^3)
1	0.32	0.90	36,000	111	95	6,061
2	0.32	0.74	30,000	88	93	5,424
3	0.37	0.74	30,000	124	123	6,218
4	0.37	0.90	36,000	148	128	6,819
6	0,31	0,97	39,000	97	86	6,258
7	0.33	0.90	36,000	112	107	6,345
Promedio	0.34	0.86	34,500	113	106	6,188
C_V (%)	7.2	10.0	9.7	17.1	14.8	6.7

Tabla 4.2: Valores numéricos de los parámetros obtenidos en el ensayo EBADE

En resumen, las dispersiones de los parámetros analizados estuvieron por debajo del 18 % en todos los casos, y solo fueron superiores al 10 % en los valores de los módulos promedio durante el primer y segundo escalón de deformación. Por lo tanto la repetibilidad del ensayo se puede considerar acceptable. La mayor dispersión de resultados obtenida para la medida del módulo complejo en los primeros escalones de amplitud de deformación puede ser debida a que las deformaciones impuestas son muy pequeñas y están muy próximas al límite de sensibilidad de la prensa.

Sensibilidad a la frecuencia de ensayo

Una vez establecida la repetibilidad del procedimiento de ensayo, se procedió a analizar la influencia de una variable a la cual los ligantes bituminosos son muy sensibles, la frecuencia de ensayo. Para ello se empleó el mismo betún que en el estudio descrito en la sección 4.1.1, B 60/70. Se fabricaron un total de ocho probetas de las cuales se ensayaron siete. Cada una de ellas fue ensayada a una frecuencia de ensayo diferente; 1, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 Hz. En los ensayos a 25 y 30 Hz el control de desplazamiento de la prensa hidráulica no ha sido capaz de mantener la amplitud de desplazamiento tan constante como en los ensayos a menor frecuencia, por lo que los resultados obtenidos a estas frecuencias pueden mostrar diferencias que no estén directamente relacionadas con la frecuencia de ensayo sino también con pequeñas variaciones en la deformación aplicada a la probeta.

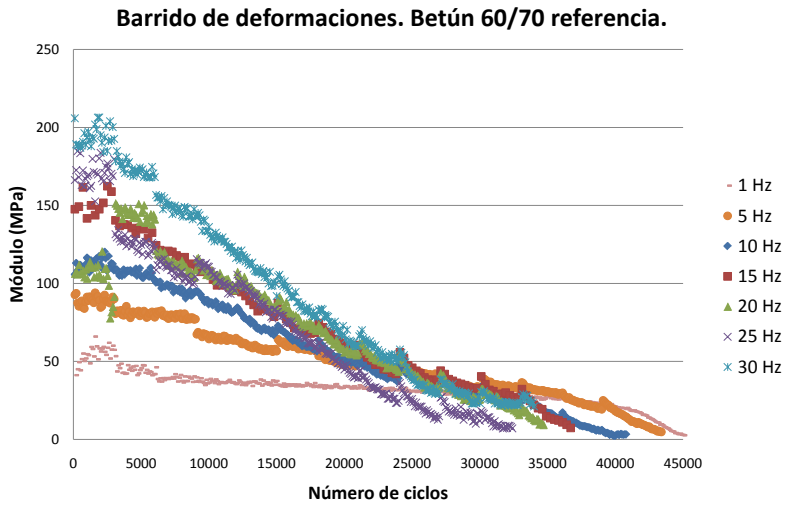


Figura 4.4: Módulo complejo frente al número de ciclos en el ensayo EBADE a diferentes frecuencias. Ensayos realizados a 10ºC.

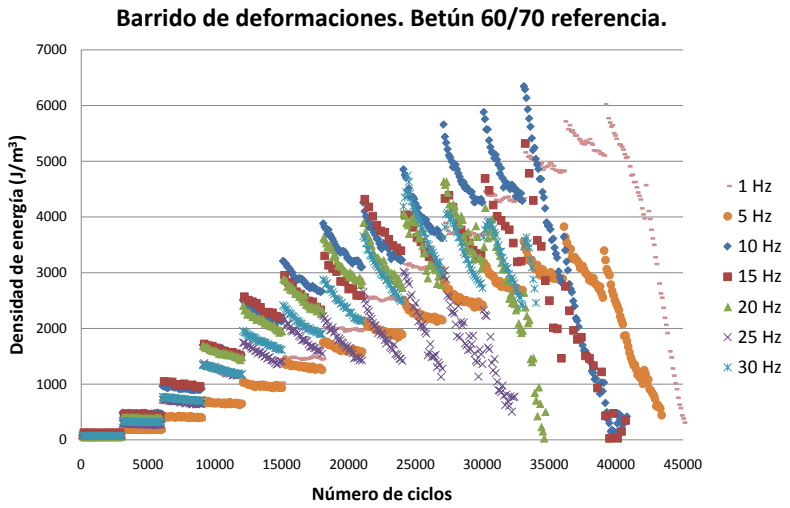


Figura 4.5: Densidad de energía disipada frente al número de ciclos en el ensayo EBADE a diferentes frecuencias. Ensayos realizados a 10ºC.

En la figura 4.4 se observa claramente la influencia de la frecuencia de ensayo en el valor del módulo complejo del ligante. La tendencia general muestra un clara disminución del módulo a medida que disminuye la frecuencia de ensayo, con la particularidad del ensayo realizado a 20 Hz para el cual el valor del módulo durante el escalón inicial de deformación fue inesperadamente bajo en comparación con los ensayos realizados a otras frecuencias y con el valor del módulo en el segundo escalón de deformación del mismo ensayo.

Otra consecuencia clara que se desprende de la figura 4.4 es que a medida que aumenta la frecuencia el cambio de propiedades mecánicas, módulo, que sufre la probeta se acelera en términos del número de ciclos, es decir, dentro de cada escalón la pérdida de módulo es más acentuada para los ensayos realizados a mayores frecuencias. Como consecuencia de esto la deformación de fallo disminuye a medida que aumenta la frecuencia. En este caso la densidad de energía disipada máxima ha mostrado un comportamiento fluctuante para diferentes frecuencias de ensayo, figura 4.5.

Frecuencia *(Hz)*	σ_{max} (MPa)	$\varepsilon_F(\%)$	N_{Ciclos}	$E^*\,1^{er}$ (MPa)	DED_{max} (J/m^3)
1	0.25	1.04	42,000	55	6,021
5	0.33	0.98	39,000	89	3,827
10	0.33	0.90	36,000	112	6,345
15	0.37	0.90	36,000	135	5,318
20	0.36	0.75	30,000	105	4,641
25 (*)	0.33	0.74	30,000	171	3,038
30 (*)	0.36	0.81	33,000	194	4,742

Tabla 4.3: Valores numéricos de los parámetros obtenidos en los ensayos EBADE a diferentes frecuencias. * Problemas con el control de desplazamiento a altas frecuencias.

En la tabla 4.3 se observa la evolución de los diferentes parámetros obtenidos en cada ensayo con la frecuencia aplicada. La tensión máxima, σ_{max}, ha aumentado cuando la frecuencia aumenta de 1 a 20 Hz. La deformación de fallo, ε_F ha disminuido con el aumento de la frecuencia de 1 a 25 Hz. Este comportamiento cae dentro de lo esperado para este material, ya que aumentar la frecuencia de ensayo equivale a disminuir la temperatura de la muestra [61, 57, 62, 44], y a menores temperaturas la deformación que el ligante puede soportar sin romper acostumbra a ser menor. El módulo inicial ha seguido una tendencia ascendente con la frecuencia a excepción del valor obtenido en el ensayo a 20 Hz, que puede ser debido a la baja precisión del equipo a bajas deformaciones y altas frecuencias. Por último, la densidad de energía disipada máxima ha mostrado un comportamiento errático, ha descendido de 1 Hz a 5 Hz para después alcanzar

su valor máximo a 10 Hz. A partir de aquí ha descendido de 10 Hz a 25 Hz y finalmente ha vuelto a aumentar de 25 Hz a 30 Hz.

Analizando de nuevo las figuras 4.4 y 4.5 se observa como a medida que aumenta la frecuencia de ensayo, la pérdida de módulo y de densidad energía disipada aumenta para un mismo escalón de deformación. Es decir, el material empieza a modificar su respuesta por efecto de su comportamiento viscoelástico no lineal o por deterioro a niveles de deformación menores cuando la frecuencia es mayor. Si nos fijamos en concreto en el sexto escalón de deformación en la figura 4.5 se observa claramente como la energía solo se mantiene constante para la probeta ensayada a 1 Hz, la probeta ensayada a 5 Hz empieza a mostrar una ligera pérdida, mientras que las probetas ensayadas a frecuencias mayores muestran pérdidas importantes y mayores cuanto mayor es la frecuencia.

Como resumen del estudio sobre la influencia de la frecuencia de ensayo, se puede establecer que el ensayo EBADE es sensible al cambio de esta variable. La evolución del módulo complejo y la deformación de fallo, aumento del primero y descenso del segundo con el aumento de la frecuencia de ensayo, han sido coherentes con lo esperado para este tipo de material. Mediante la variación de la frecuencia en el ensayo EBADE se podría determinar el comportamiento de un ligante a diferentes temperaturas conociendo previamente el factor de desplazamiento a_T (*shift factor*) que relaciona velocidades de aplicación de carga con temperaturas para materiales viscoelásticos [62].

Sensibilidad al tipo de ligante

Para evaluar la sensibilidad del procedimiento EBADE a la penetración del ligante bituminoso ensayado se realizaron ensayos con tres ligantes de diferente penetración, B 60/70, B 40/50 y B 13/22[1]. Adicionalmente se ensayó un ligante modificado con polímero del tipo BM3c. El comportamiento de este último ligante no puede ser comparado directamente con los anteriores debido a la presencia del polímero que provoca un comportamiento del betún totalmente diferente al presentado por los ligantes convencionales.

En la figura 4.6 se observa como a medida que aumenta la penetración del ligante disminuye la tensión máxima que registra sistema de adquisición de datos y aumenta la deformación que puede tolerar el ligante sin fallar completamente, tabla 4.4. En concreto, el fallo de los ligantes B 13/22 y B 40/50 se produce de una forma brusca y coincidiendo con un aumento de la deformación, mientras que el ligante B 60/70 experimenta una pérdida progresiva de tensión y módulo, figura 4.7, hasta que ambos se acercan a cero. Por su parte el ligante modificado con polímero, BM3c, registra tensiones y módulos inferiores a las del resto de ligantes, pero es capaz de soportar deformaciones superiores al 1,5 % sin llegar a fallar completamente. De hecho no fue posible fracturar en dos partes la probeta de ligante en ninguno de los ensayos llevados a cabo.

[1] El índice de penetración a 25°C es una medida de la dureza de los ligantes bituminosos, de forma que cuanto menor es éste mayor es la dureza y por lo tanto la rigidez del ligante.

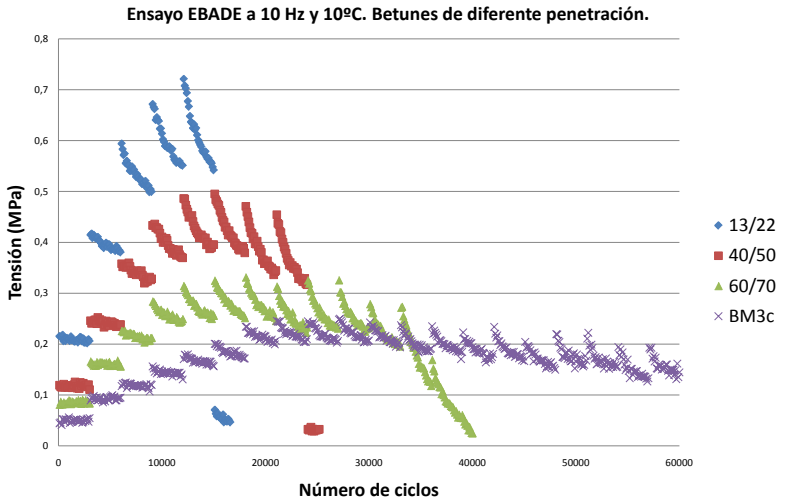


Figura 4.6: Evolución de la tensión registrada con el número de ciclos durante el ensayo EBADE para los cuatro ligantes estudiados.

Ligante	σ_{max} (MPa)	$\varepsilon_F(\%)$	N_{Ciclos}	E^* 1er (MPa)	DED_{max} (J/m^3)
13/22	0.72	0.37	15,000	285	4,578
40/50	0.50	0.58	24,000	157	5,550
60/70	0.33	0.90	36,000	112	6,345
BM3c	0.20	>1.50	>60,000	68	6,795

Tabla 4.4: Valores numéricos de los parámetros obtenidos en los ensayos EBADE realizados a los diferentes betunes.

Del análisis de la evolución de la densidad de energía con el número de ciclos, figura 4.8, se desprende que los ligantes más duros disipan mayor cantidad de energía para una misma deformación, y a la vez experimentan mayores pérdidas en el transcurso de cada escalón. Finalmente como los ligantes más dúctiles pueden alcanzar deformaciones más elevadas sin romper, acaban obteniendo valores más elevados para la densidad de energía disipada máxima. Por su parte el ligante BM3c, al no llegar a romper alcanzó la mayor densidad de energía disipada, y fue el que menores decrementos de esta variable presentó en los escalones de deformación iniciales.

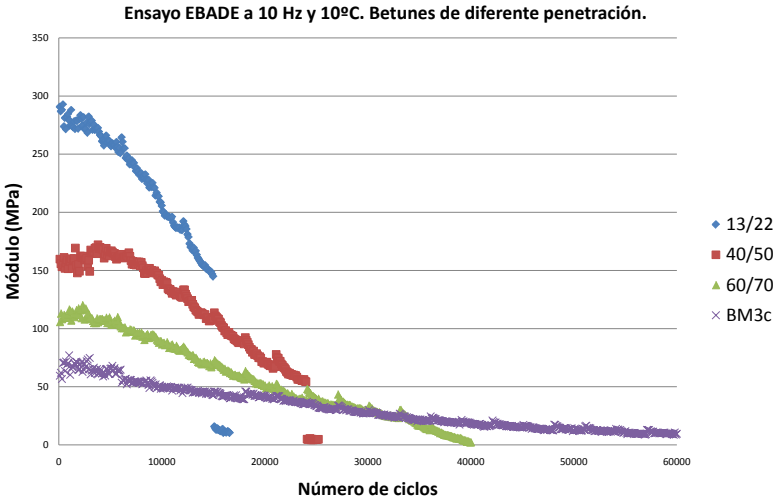


Figura 4.7: Evolución del módulo complejo con el número de ciclos durante el ensayo EBADE para los cuatro ligantes estudiados.

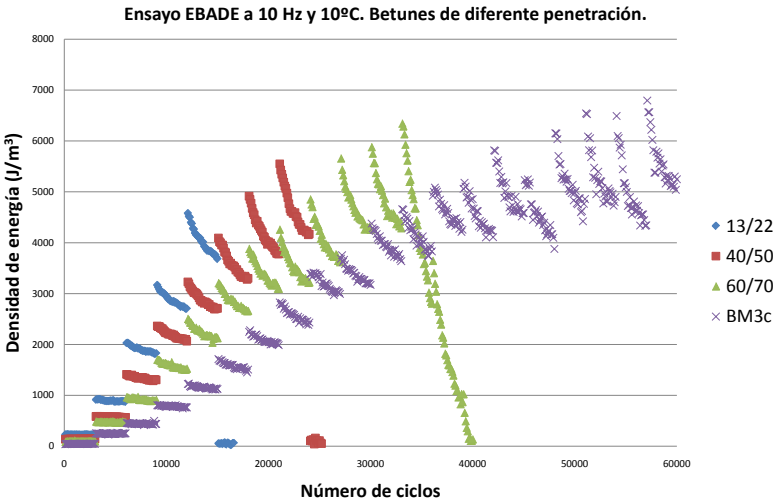


Figura 4.8: Evolución de la densidad de energía con el número de ciclos durante el ensayo EBADE para los cuatro ligantes estudiados

Como se ha mostrado en este apartado, el procedimiento de ensayo EBADE es claramente sensible a la penetración del ligante ensayado. Los resultados obtenidos fueron coherentes con lo esperado, ya que aquellos ligantes más rígidos mostraron mayores resistencias pero rompieron a deformaciones más bajas. El tamaño de la elipses descritas por los ligantes más duros fue mayor para un mismo nivel de deformaciones, pero los ligantes más dúctiles, al ser capaces de alcanzar niveles de deformación superiores, obtuvieron mayores densidades de energía disipada máxima. El ligante modificado con polímero, BM3c, mostró un comportamiento totalmente distinto al resto de ligantes, y su elevada ductilidad hizo imposible reproducir el fallo total de las probetas ensayadas.

En resumen, con este tipo de ensayo es posible comparar de una forma rápida y sencilla el comportamiento a fatiga de diferentes ligantes. Mediante el análisis del módulo complejo inicial y la deformación de fallo se obtienen en un mismo ensayo la rigidez del material y su deformación máxima antes de rotura, dos parámetros que caracterizan el comportamiento a fatiga de los ligantes. Para igual módulo, aquel ligante con mayor deformación de fallo será el que presente el mejor comportamiento a fatiga. Para ligantes con diferentes módulos, es necesario conocer sus condiciones de aplicación para definir cual responderá mejor en las condiciones dadas: temperatura, estructura del firme, etc.,...

Sensibilidad al número de ciclos por escalón de deformación

Al tratarse de un ensayo cíclico que pretende obtener información sobre el comportamiento a fatiga de los ligantes bituminosos, se hacía necesario analizar la influencia que tiene en los resultados modificar el número de ciclos por escalón de deformación. Para ello se empleó de nuevo un ligante B 60/70 y se realizaron barridos de deformaciones con 3.000, 5.000 y 10.000 ciclos por escalón. Se ensayaron tres probetas para cada configuración.

En primer lugar se realizaron los ensayos a 3.000 y 10.000 ciclos por escalón con periodos de un minuto de reposo entre escalones de deformación sucesivos. El aumento del módulo después de estos periodos muestran la influencia que estos tienen en el comportamiento del ligante.

Para evitar introducir más variables en el estudio se realizó un tercer ensayo a 5.000 ciclos por escalón suprimiendo el periodo de reposo y evitando así el efecto que la autorreparación (*healing*) puede tener en la degradación del material.

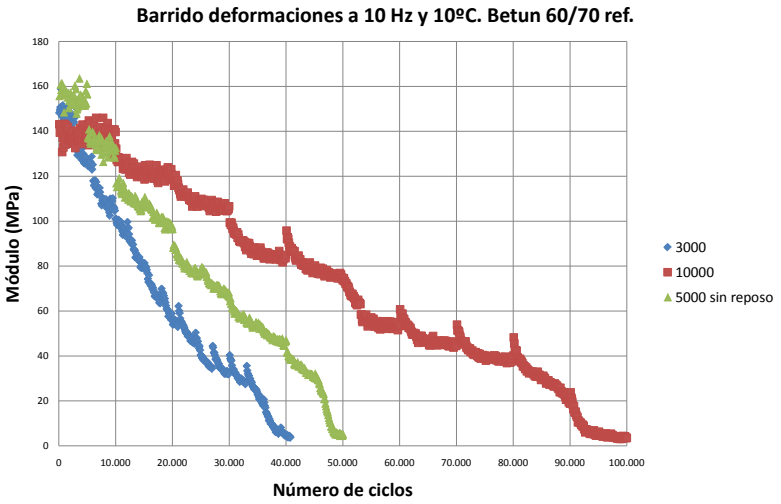


Figura 4.9: Evolución del módulo complejo con el número de ciclos en los ensayos EBADE con diferentes duraciones de escalón de deformación.

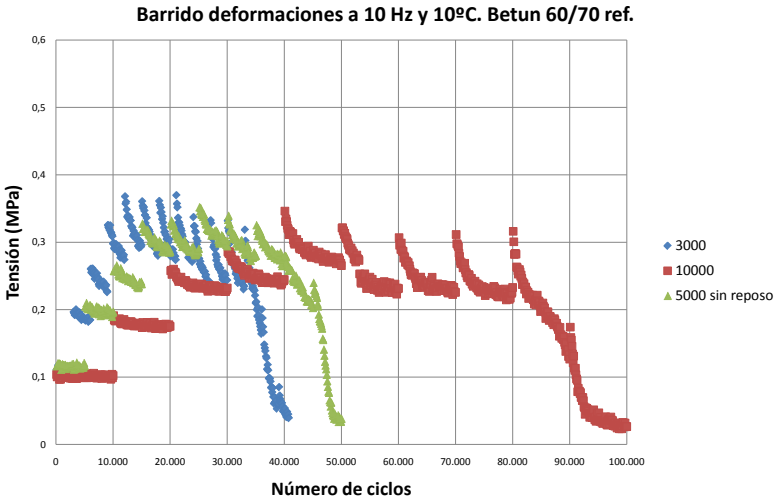


Figura 4.10: Evolución de la tensión con el número de ciclos en los ensayos EBADE con diferentes duraciones de escalón de deformación.

Los valores para la tensión máxima y el módulo inicial fueron similares, estuvieron dentro del intervalo de variación obtenido en el apartado 4.1.1 para estas variables. En el ensayo de 10,000 ciclos/escalón la tensión y el módulo muestran un cambio en la tendencia descendente dentro de cada escalón, es decir, llegan a la fase estacionaria en que la pérdida del módulo es lineal, figura 2.13. Por su parte la deformación máxima que puede soportar el ligante en el ensayo de 3,000 ciclos por escalón es mayor, así como la densidad de energía máxima. Esto puede ser debido a que en este ensayo el número de ciclos a que se ve sometida la probeta es mucho menor para llegar a un mismo nivel de deformación. Aún así, los valores del módulo para iguales niveles de deformación son muy similares, lo que podría indicar que la pérdida de módulo en este ensayo depende más de la deformación aplicada que del número de ciclos por escalón. Es posible que en el noveno escalón de deformación, que es en el que el ensayo de 10,000 ciclos/escalón finaliza, 3.,000 ciclos no sean suficientes para romper y por lo tanto el betún se recupere durante el minuto de reposo, efecto *healing* [33, 37, 54, 34, 53].

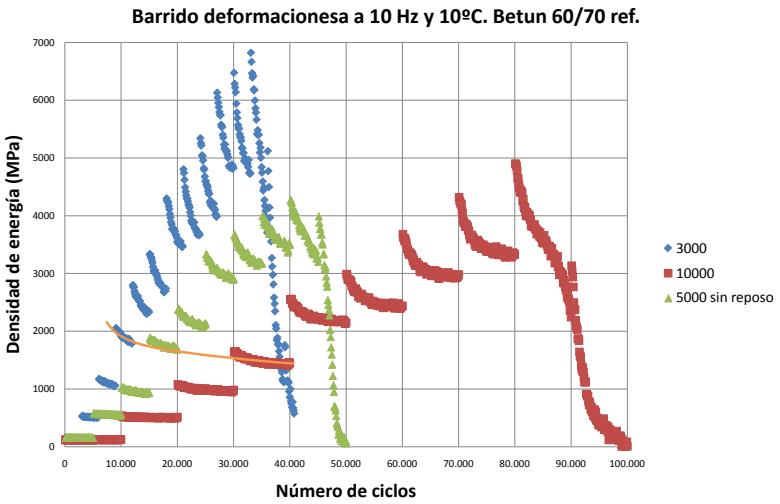


Figura 4.11: Evolución de la densidad de energía disipada con el número de ciclos en los ensayos EBADE con diferentes duraciones de escalón de deformación.

Para eliminar la influencia del *healing* se suprimió el periodo de reposo en un tercer ensayo que se realizó con 5,000 ciclos/escalón.

En la figura 4.11, se observa como para la misma amplitud de deformación, el valor en el cual la DED se estabiliza es muy similar sea cual sea el número de ciclos por escalón escogido, e independientemente de si se introduce un periodo de reposo entre escalones. En concreto, se ha añadido un línea a forma de guía para comparar las tres opciones en el cuarto escalón de deformación. Este hecho

indicaría que la previa historia de carga aplicada al material no afecta al valor en el cual se estabiliza la DED a una amplitud de deformación y frecuencia dadas, lo cual contradice la definición de material viscoelástico (propiedades dependientes del tiempo y del modo de carga). El mismo comportamiento puede observarse para el módulo complejo.

Ciclos/escalón	σ_{max} (MPa)	$\varepsilon_F(\%)$	E^* 1er (MPa)	DED_{max} (J/m^3)
3.000	0,37	0,91	148	6819
5.000 sin reposo	0.35	0.67	155	4277
10.000	0,35	0,67	138	4902

Tabla 4.5: Valores numéricos de los parámetros obtenidos en los ensayos EBADE realizados para diferente número de ciclos por escalón de deformación.

En los ensayos a 3,000 ciclos por escalón el módulo complejo y la DED no llegaron ha alcanzar la fase de estabilización, mientras que en los ensayos a 10,000 ciclos por escalón se llegó claramente a esta fase en todos los escalones de deformación aplicados. Sin embargo, los ensayos realizados a 10,000 por escalón tuvieron una duración cercana a las tres horas de ensayo, sumado al periodo de 1 hora de espera para garantizar el secado del adhesivo. Por lo tanto, el número máximo de ensayos que podría realizarse por día con esta configuración serían 2. Dado que el objetivo de esta tesis es desarrollar un método de ensayo rápido en comparación con el método del barrido de tiempo, esta configuración se descartó. Por su parte, los ensayos realizados a 5,000 ciclos por escalón, mostraron que este número de ciclos es suficiente para alcanzar el periodo de estabilización en la mayoría de los escalones de deformación, reduciéndose el tiempo de ensayo a la mitad con respecto a emplear 10,000 ciclos/escalón. Así mismo, al suprimir los periodos de reposo, se observó un comportamiento más suave en la evolución del módulo complejo y la DED. Por todo ello, la configuración correspondiente a 5,000 ciclos por escalón sin periodos de reposo para el ensayo EBADE fue la escogida, para llevar a cabo el resto de estudios contenidos en esta tesis.

4.1.2. Barridos de tiempo

Una vez finalizado el proceso de calibración y definido el protocolo de ensayo, el siguiente paso consistió demostrar que el ensayo EBADE es capaz de caracterizar el comportamiento a fatiga de estos materiales. Para ello fue necesario obtener las leyes de fatiga de los ligantes objeto del estudio mediante el procedimiento clásico basado en la aplicación de barridos de tiempo, para más tarde compararlos con los ensayos EBADE y determinar si este último proporciona información respecto al comportamiento a fatiga de los ligantes bituminosos. Todos los ensayos se realizaron a 10°C de temperatura y a una frecuencia de 10 Hz.

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de barrido de tiempo, llevados a cabo empleando la configuración de ensayo del procedimiento EBADE. En estos ensayos se aplican ciclos de carga a una amplitud de deformación constante a la muestra hasta que se produce el fallo. Con ello se pretendía determinar la ley de fatiga por el procedimiento convencional de cuatro ligantes: B 13/22, B 40/50, B 60/70 y éste último después de ser sometido al procedimiento RTFOT[2] [3, 2], de aquí en adelante denominado B 60/70 RTFOT.

Las deformaciones a la cuales se llevaron a cabo los ensayos de barrido de tiempo fueron escogidas de forma que coincidieran con las deformaciones correspondientes a los seis primeros escalones de deformación del ensayo EBADE. Se emplearon, como mínimo, cinco ensayos para obtener la ley de fatiga de cada ligante.

Ninguno de los ensayos realizados a la deformación correspondiente al primer escalón, $7.6{\cdot}10^{-4}$ o 0.08 %, alcanzó el fallo en 2 millones de ciclos. Estos ensayos no mostraron la típica caída inicial del módulo, si no que desde un principio el módulo complejo se mantuvo constante durante todo el ensayo. Estos ensayos no proporcionaron ningún punto en la ley de fatiga ya que no se produjo el fallo, pero sirvieron para hallar una cota superior del límite de fatiga del betún, deformación por debajo de la cual no se produce fatiga. Estos ensayos se realizaron tan solo en el ligante más duro, B 13/22, y en el más blando, B 60/70, ensayos a 0.08 % de deformación en las figuras 4.12 y 4.13.

Por contra, los ensayos realizados a mayores deformaciones mostraron las tres fases del proceso de fatiga. En concreto los ligantes B 60/70 y B 40/50 alcanzaron cerca del millón de ciclos a $1.5{\cdot}10^{-3}$ de deformación, mientras que el B 13/22 falló en menos de 150,000 ciclos a esta deformación. Para obtener un ensayo cercano al millón de ciclos con este último ligante se realizó un ensayo a una deformación intermedia entre el primer y segundo escalón, $1.1{\cdot}10^{-3}$. Respecto a los módulos complejos iniciales, el B 40/50 y el B 60/70 estuvieron entre 120 y 150 MPa, mientras que el B 13/22 alcanzó valores entre 300 y 370 MPa, más de el doble.

En todos los ensayos realizados se observó el mismo patrón de comportamiento. A deformaciones bajas, la caída inicial del módulo en los primeros 5,000 ciclos fue mucho menor que a deformaciones altas. Durante la segunda fase del ensayo, en la que el módulo decrece de forma lineal, la disminución del módulo con el número de ciclos a deformaciones bajas fue tan pequeña que la precisión de la maquinaria de ensayo no permitió detectarla, con lo que las curvas obtenidas muestran un valor constante del módulo a lo largo de esta fase. En los ensayos a deformaciones mayores, durante esta fase, se observan pendientes mayores, hasta un punto en que, a las deformaciones más altas, se hace más difícil detectar la transición entre la segunda y la tercera fase, debido a la elevada pendiente de la curva de evolución del módulo durante la fase lineal. En estos casos, la deformación es tan alta que la probeta empieza a fallar en los primeros ciclos. Para ilustrar este concepto se ha añadido una ampliación de la figura 4.12, figu-

[2] Este procedimiento de envejecimiento está descrito en las normas ASTM standard D 2872-04 y UNE EN 12607-1, y se emplea para simular el proceso de envejecimiento que el ligante sufre durante el proceso de fabricación de la mezcla bituminosa.

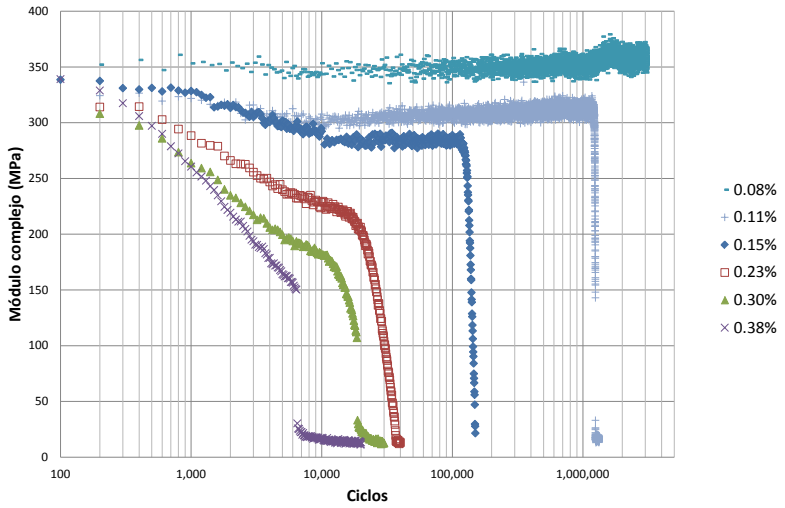


Figura 4.12: Ensayos de barrido de tiempo a diferentes deformaciones para el ligante B 13/22 a 10ºC y 10 Hz.

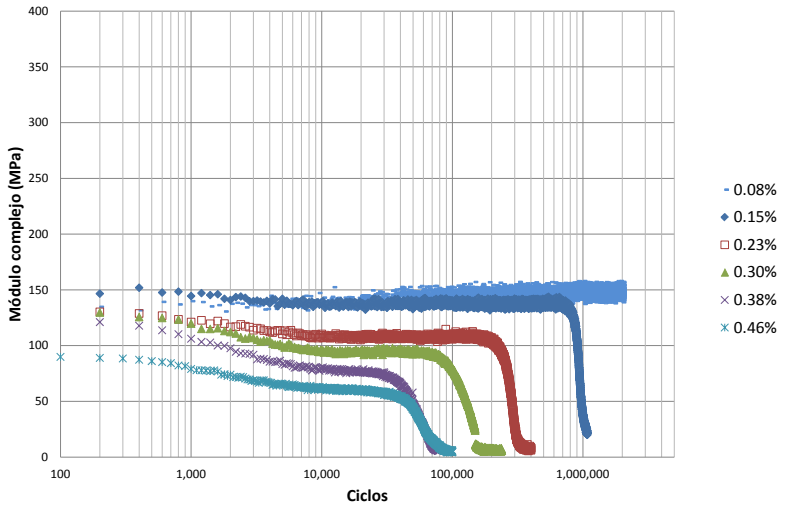


Figura 4.13: Ensayos de barrido de tiempo a diferentes deformaciones para el ligante B 60/70 a 10ºC y 10 Hz.

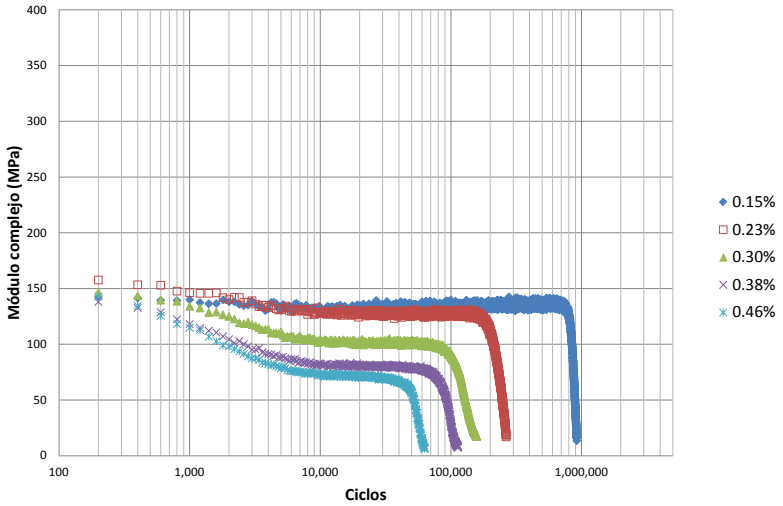


Figura 4.14: Ensayos de barrido de tiempo a diferentes deformaciones para el ligante B 40/50 a 10ºC y 10 Hz.

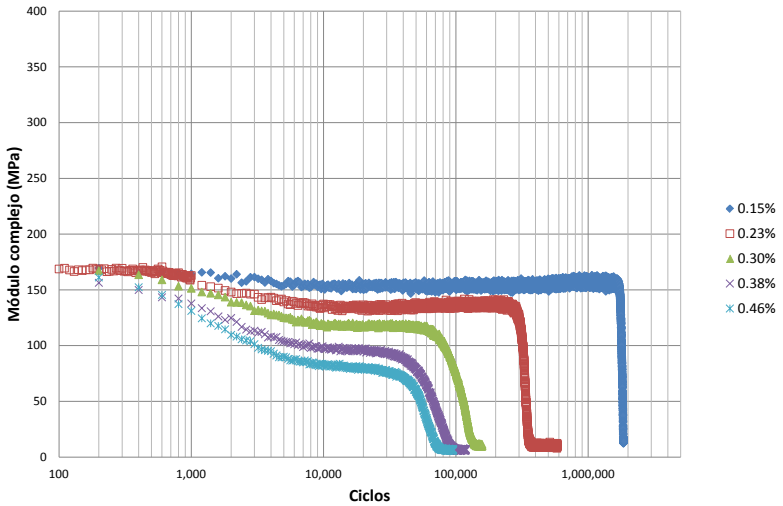


Figura 4.15: Ensayos de barrido de tiempo a diferentes deformaciones para el ligante B 60/70 RTFOT a 10ºC y 10 Hz.

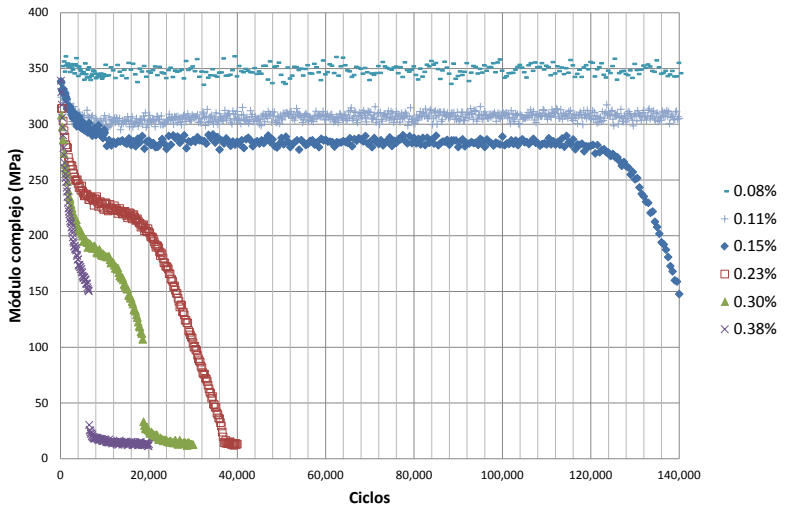


Figura 4.16: Primeros 140,000 ciclos de los ensayos de barrido de tiempo a diferentes deformaciones para el ligante B 13/22 a 10ºC y 10 Hz.

ra 4.16, en la que se muestran los primeros 140,000 ciclos de cada ensayo en escala lineal.

En concreto, en la figura 4.16, se observa como a una deformación de 0.15 % se produce en una caída de alrededor de un 15 % del módulo inicial y a partir de ese valor el módulo se mantiene estable hasta cerca de 120,000 ciclos cuando empieza a caer, y en 20,000 ciclos más falla por completo. Por otro lado, se observa como en el ensayo realizado a 0.38 % de deformación, el módulo decrece desde los primeros ciclos de carga, produciéndose el fallo total sin haber experimentado un periodo de estabilización.

Las curvas módulo-número de ciclos obtenidas en los ensayos de barrido de deformaciones fueron utilizadas para calcular las leyes de fatiga de cada ligante. Para ello se empleó el criterio convencional de fallo descrito en la norma europea UNE-EN 12697-24, que define el fallo como una reducción del 50 % respecto al módulo inicial, en este caso, el valor obtenido en el ciclo 200. La figura 4.17 muestra las leyes de fatiga obtenidas mediante este método.

Las cuatro leyes de fatiga obtenidas presentan diferencias entre si, figura 4.17. Sin embargo, los puntos pertenecientes a los ligantes B 40/50, B 60/70 y B 60/70 RTFOT ocupan todos una misma zona del gráfico, y por lo tanto las diferencias en sus leyes de fatiga están más asociadas a la dispersión del ensayo que a diferencias sustanciales en su comportamiento a fatiga. Por otro lado, los puntos pertenecientes al ligante B 13/22, si se encuentran claramente separados de los anteriores, situados por debajo de éstos y describiendo una ley de fatiga

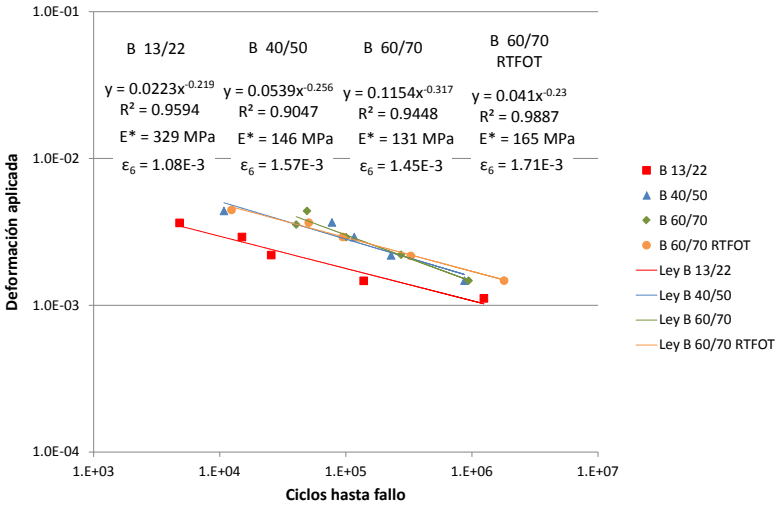


Figura 4.17: Leyes de fatiga obtenidas mediante los ensayos de barrido de tiempo a 10ºC y 10 Hz.

de menos pendiente, como era de esperar para un ligante considerablemente más duro. No se observaron diferencias en módulos ni leyes de fatiga entre los ligantes B 40/50 y B 60/70, mientras que el B 60/70 RTFOT mostró un módulo ligeramente superior y una deformación a $1 \cdot 10^6$ ciclos, representada como ε_6 en la figura 4.17, también superior. Por lo tanto, las leyes de fatiga obtenidas mediante los ensayos de barrido de tiempo no permitieron observar diferencias significativas entre ligantes de similar penetración.

En la tabla 4.6 se muestran los valores de los módulos complejos iniciales para cada ensayo. Se definió como modulo complejo inicial el valor de éste en el ciclo 200, ya que se estimó que sería el ciclo a partir del cual la maquinaria de ensayo había estabilizado la señal. La variación de este parámetro ha sido de alrededor del 5 %, excepto en el caso del B 60/70 que alcanzó el 17 %, debido a un resultado anómalo para el ensayo a mayor deformación. Sin tener en cuenta este dato el coeficiente de variación se reduce al 8 %. Se observó la tendencia a la disminución del módulo inicial cuanto mayor era la amplitud de deformación aplicada. Esto puede ser debido a que a mayores deformaciones la disminución inicial del módulo es más rápida, de forma que en el ciclo 200 probetas sometidas a mayores deformaciones muestran módulos menores. En la sección 4.1.4 se muestra como la magnitud de la reducción inicial del módulo está relacionada con la amplitud de deformación aplicada.

Amplitud de deformación (%)	Módulo complejo inicial (MPa)			
	B 13/22	B 40/50	B 60/70	B 60/70 RTFOT
0.08	352	-	135	-
0.11	325	-	-	-
0.15	338	143	147	170
0.23	314	158	130	169
0.30	308	147	156	167
0.38	339	138	129	156
0.46	-	143	90	161
C_V (%)	5	5	17	4

Tabla 4.6: Valores numéricos de los módulos complejos en el ciclo 200 en los ensayos de barrido de tiempo

4.1.3. Barridos de deformación ascendentes

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de barrido de deformaciones ascendentes, aplicados a los cuatro ligantes estudiados. Todos los ensayos se realizaron a una temperatura de 10°C y una frecuencia de 10 Hz. Se ensayaron un mínimo de tres probetas por ligante, por lo que las curvas presentadas en esta sección son curvas promedio.

Este tipo de ensayo combina dos métodos de degradación, la repetición de ciclos de carga y el aumento de la deformación. Esto hace que la evolución tanto del módulo complejo como de la densidad de energía disipada será diferente a la observada en los ensayos de barrido de tiempo. En especial este último parámetro requiere especial atención por su comportamiento a lo largo del ensayo y por su importancia para determinar la deformación de fallo.

En ensayos de barrido de tiempo, amplitud de deformación constante, la densidad de energía disipada se comporta de igual manera que el módulo complejo, experimentando las tres fases del proceso de fatiga anteriormente mencionadas. Sin embargo, el comportamiento de este parámetro con los aumentos de amplitud de deformación es completamente distinto al del módulo. Cuando se aumenta la amplitud de deformación aplicada, el área del ciclo de histéresis descrito en el plano tensión-deformación aumenta, siempre y cuando la probeta no falle completamente, lo cual implica un aumento de la densidad de energía disipada. Esto hace que este parámetro muestre dos comportamientos diferenciados a lo largo de los ensayos de barrido de deformaciones; por un lado dentro de cada escalón a deformación constante se observa una disminución de tipo exponencial hasta alcanzar una estabilización (comportamiento característico de

los materiales tixotrópicos), y por otro lado al aumentar la deformación entre escalón y escalón, el valor de la energía disipada aumenta considerablemente. Por lo tanto, la representación gráfica de este parámetro a lo largo del ensayo muestra de forma muy clara cuando se produce el fallo total de la probeta, ya que la energía disipada aumenta en cada escalón así como aumenta la disminución de ésta dentro de cada escalón, hasta que se produce una pérdida total y por lo tanto el fallo, figura 4.19. Dicho de otra manera, el fallo se produce apenas ciclos después de alcanzar el máximo valor de densidad de energía disipada de todo el ensayo.

Para realizar el estudio comparativo entre los cuatro ligantes, se definieron tres parámetros con los que se pretendió representar el comportamiento de cada uno de los ligantes de la manera más general posible. En primer lugar el módulo complejo promedio durante el primer escalón, E^*_{1er}, con el que se pretende dar una medida de la rigidez del ligante. Como se ha demostrado en la sección 4.1.2, la deformación del primer escalón, 0.08 %, no es suficiente para producir ningún tipo de daño en el material y por lo tanto se puede considerar que el material se encuentra inalterado durante los primeros 5,000 ciclos. El siguiente parámetro de interés es el valor máximo de la densidad de energía disipada alcanzado durante el ensayo, DED_{max}. Este parámetro está directamente relacionado con la deformación a la que se produce el fallo, ya que el fallo se produce pocos ciclos después de haber alcanzado este valor. Por último, la deformación de fallo, que se ha definido como la deformación a la cual la densidad de energía disipada se ha reducido a la mitad de su valor máximo. En la tabla 4.7 se muestran los valores obtenidos para estos tres parámetros.

Ligante	E^*_{1er} (MPa)	DED_{max} (J/m^3)	Deformación de fallo (%)
B 13/22	345	5,061	0.53
B 40/50	174	4,476	0.68
B 60/70	146	4,470	0.68
B 60/70 RTFOT	180	4,951	0.76

Tabla 4.7: Valores numéricos para los tres parámetros calculados en los ensayos de barrido de deformaciones ascendentes.

Analizando los resultados de la tabla 4.7, se observa que los ligantes B 13/22 y B 60/70 RTFOT, a pesar de mostrar módulos y deformaciones de fallo completamente distintas, presentan una densidad de energía disipada máxima muy similar. Este hecho demuestra que el parámetro densidad de energía disipada aglutina las dos propiedades claves de un material que caracterizan su comportamiento a fatiga, su rigidez y su ductilidad. Ambos materiales presentan rigideces y ductilidades diferentes pero ambos pueden alcanzar la misma densidad de energía máxima antes de fallar.

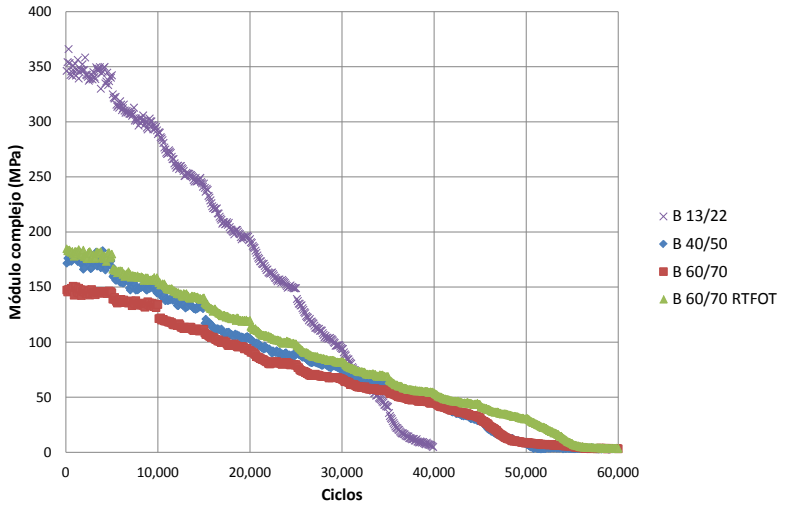


Figura 4.18: Evolución del módulo complejo en los ensayos de barrido de deformaciones ascendentes a 10ºC y 10 Hz.

En la figura 4.18 se observa de nuevo, como el ligante B 13/22 obtiene unos resultados completamente distintos a los mostrados por el resto de ligantes, los cuales a su vez se encuentran muy cerca unos de otros. El ligante B 13/22 obtuvo un módulo muy superior al resto de ligantes y falló a una deformación mucho menor.

Como se comentado con anterioridad, la representación gráfica de la evolución de la densidad de energía disipada con el número de ciclos, figura 4.19, permite obtener fácilmente la deformación a la cual se produce el fallo. Claramente el B 13/22 falló a una deformación inferior que el resto de ligantes, los cuales alcanzaron niveles similares, siendo mayor el del B 60/70 RTFOT. Si se comparan las deformaciones de fallo obtenidas para los ligantes con los valores de ε_6 presentados en la sección 4.1.2, se observa que existe una correlación entre ambos parámetros: el ligante B 13/22 obtiene el valor más bajo, los ligantes B 40/50 y B 60/70 obtienen valores similares, y el valor más alto corresponde al ligante B 60/70 RTFOT.

Resumiendo los resultados de los ensayos de barrido de deformaciones clasificaron de la misma manera que los ensayos de barrido de tiempo el comportamiento a fatiga de los ligantes. Si bien es cierto que este procedimiento fue incapaz de predecir un número de ciclos hasta fallo, si fue capaz de predecir que ligante presentaría un mejor comportamiento a fatiga. Por otro lado, se debe tener en cuenta que las perdiciones de número de ciclos hasta fallo realizados por las leyes de fatiga están sujetas a un margen de error muy elevado fruto

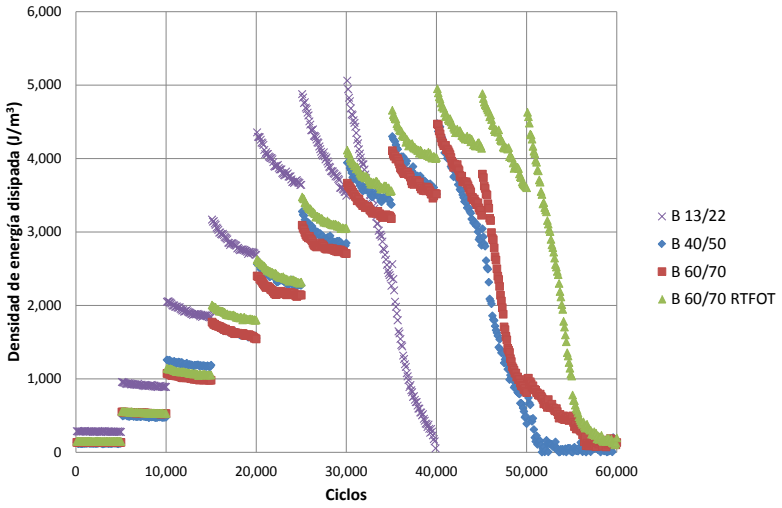


Figura 4.19: Evolución de la densidad de energía disipada en los ensayos de barrido de deformaciones ascendentes a 10°C y 10 Hz.

de la alta variabilidad que presentan los ensayos de barrido de tiempo en la determinación del número de ciclos hasta fallo.

4.1.4. Comparativa entre barridos de tiempo y deformaciones

En esta sección se han recogido los resultados obtenidos en los ensayos de barrido de tiempo y barrido de deformaciones para comparar y analizar los rasgos en común entre estos dos tipos de ensayos.

En las figuras 4.20-4.23, se ha representado la evolución del módulo complejo y de la densidad de energía disipada con el número de ciclos para los ensayos de barrido de deformaciones y barrido de tiempo en un mismo gráfico.

En todos los casos se observa como, tanto el módulo complejo como la densidad de energía disipada, alcanzan los mismo valores después de 5,000 ciclos en los ensayos de barrido de tiempo como al final de cada escalón siempre que la amplitud de deformación aplicada coincide. Para ilustrar este fenómeno, se tabularon los valores del módulo complejo y de la densidad de energía disipada al final de cada escalón, del segundo al sexto escalón, y después de 5,000 ciclos en cada uno de los ensayos de barrido de tiempo, tablas 4.8 y 4.9.

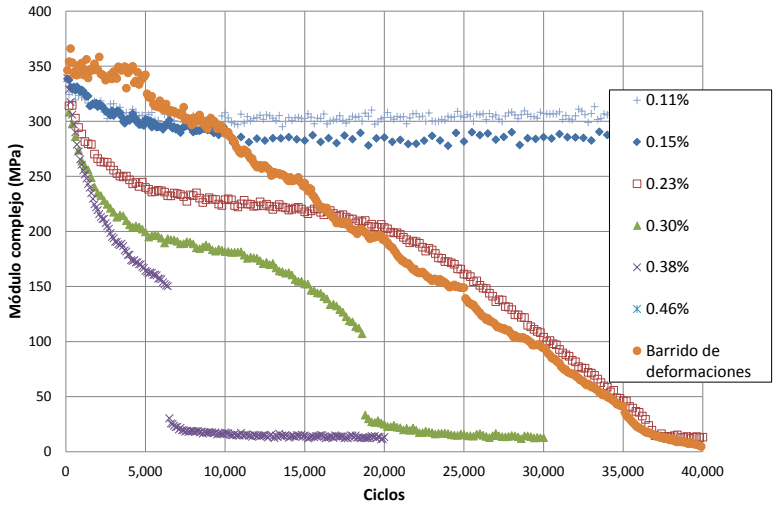


Figura 4.20: Evolución del módulo complejo en los ensayos de barrido de tiempo y deformaciones para el ligante B 13/22 a 10ºC y 10 Hz.

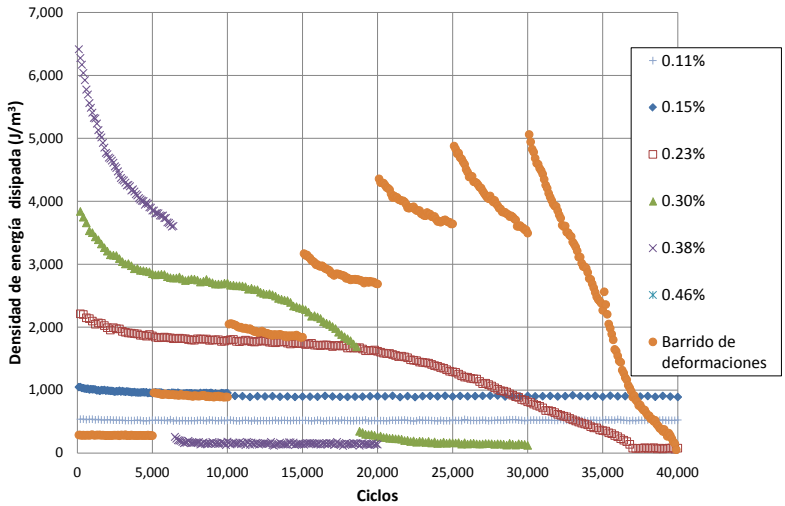


Figura 4.21: Evolución de la densidad de energía disipada en los ensayos de barrido de tiempo y deformaciones para el ligante B 13/22 a 10ºC y 10 Hz.

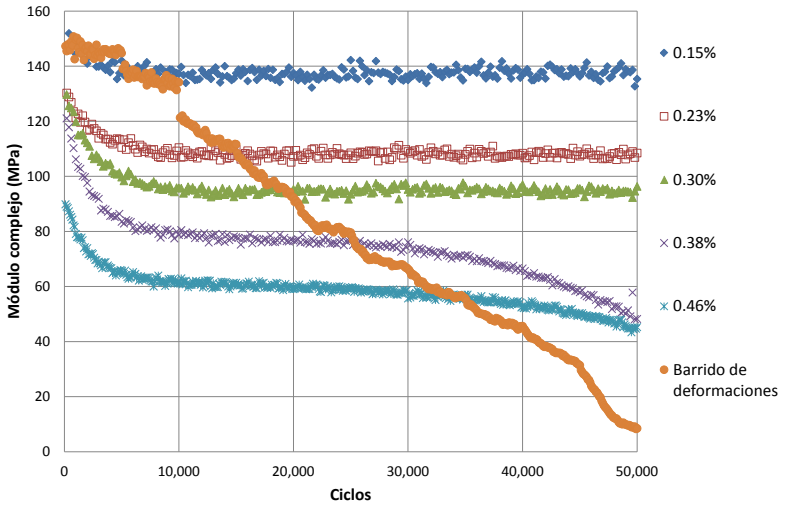


Figura 4.22: Evolución del módulo complejo en los ensayos de barrido de tiempo y deformaciones para el ligante B 60/70 a 10°C y 10 Hz.

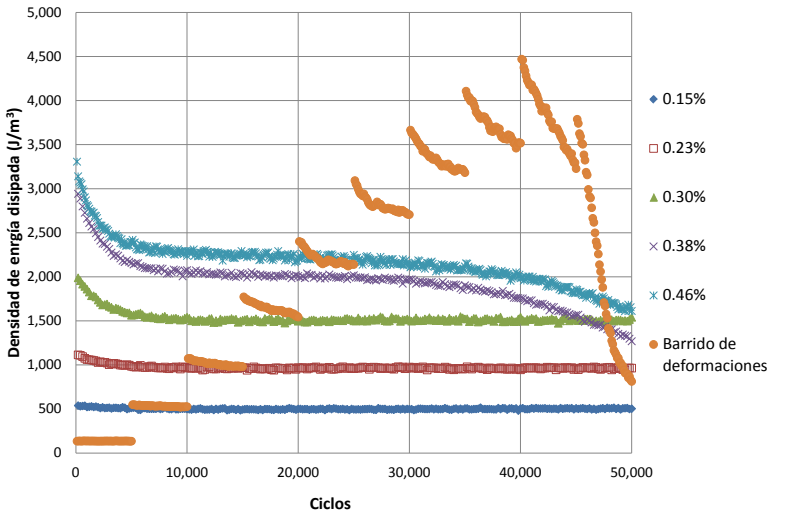


Figura 4.23: Evolución de la densidad de energía disipada en los ensayos de barrido de tiempo y deformaciones para el ligante B 60/70 a 10°C y 10 Hz.

Ligante	Parámetro	2º escalón	3º escalón	4º escalón	5º escalón	6º escalón
B 13/22	$E^*(MPa)$	289	244	194	149	-
	$DED(J/m^3)$	890	1,841	2,686	3,642	-
B 40/50	$E^*(MPa)$	147	137	104	89	77
	$DED(J/m^3)$	477	1,187	1,554	2,274	2,850
B 60/70	$E^*(MPa)$	134	112	92	80	66
	$DED(J/m^3)$	527	981	1,543	2,139	2,706
B 60/70 RTFOT	$E^*(MPa)$	156	140	120	98	82
	$DED(J/m^3)$	531	1,054	1,801	2,317	3,054

Tabla 4.8: Valores numéricos de los módulos complejos y las densidades de energía disipadas al final de algunos de los escalones de los ensayos de barrido de deformaciones.

Ligante	Parámetro	0.15 %	0.23 %	0.30 %	0.38 %	0.46 %
B 13/22	$E^*(MPa)$	302	240	200	164	-
	$DED(J/m^3)$	949	1,861	2,849	3,853	-
B 40/50	$E^*(MPa)$	130	131	111	88	79
	$DED(J/m^3)$	533	1,101	1,705	2,349	2,902
B 60/70	$E^*(MPa)$	142	110	99	84	66
	$DED(J/m^3)$	511	984	1,564	2,156	2,396
B 60/70 RTFOT	$E^*(MPa)$	154	139	125	104	90
	$DED(J/m^3)$	533	1,112	1,931	2,359	3,404

Tabla 4.9: Valores numéricos de los módulos complejos y las densidades de energía disipadas después de 5,000 en los ensayos de barrido de tiempo.

Como muestran las tablas 4.8 y 4.9, las diferencias entre estos valores son mínimas, en algunos casos menores a la propia dispersión del ensayo. Este fenómeno parece indicar que la historia previa de carga aplicada al ligante no tiene un efecto en estos dos parámetros, y que dada un amplitud de deformación aplicada, existe un valor definido para estos parámetros después de 5,000 ciclos de carga, o lo que es lo mismo, una vez se ha llegado al estado estacionario.

En las figuras 4.24 y 4.25, se han graficado los valores de estos dos parámetros enfrentados.

Los valores obtenidos para los módulos complejos están, en la mayoría de los casos, muy cerca de la recta $X = Y$ que representa la igualdad entre los valores procedentes de ambos ensayos. La regresión lineal calculada para todos estos valores se encuentra a su vez muy cerca de la recta de 45º que pasa por el origen. Por lo tanto, se puede garantizar que, independientemente de los escalones

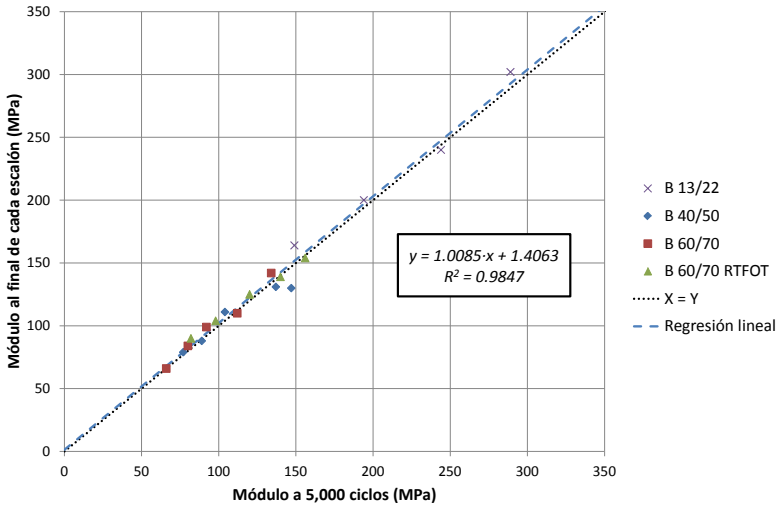


Figura 4.24: Correlación entre el módulo complejo al final de cada escalón en los barridos de deformaciones con el módulo complejo a 5,000 ciclos en los barridos de tiempo

de deformación aplicados previamente, el módulo complejo se estabiliza en el mismo valor pasados 5,000 ciclos, al menos hasta deformaciones de 0.46 %. Esto indica que el valor de estabilización de este parámetro, dada una amplitud de deformación, es independiente de la historia de carga aplicada con anterioridad.

El ajuste para los pares de valores de la densidad de energía disipada no es tan preciso como para el módulo complejo, pero aun así es lo suficientemente bueno como para defender el argumento anterior.

Estos resultados tienen una implicación muy importante. Si el módulo complejo en el cual se estabilizan los ensayos de barrido de tiempo, depende solo de la amplitud de deformación aplicada, y no de la historia previa de carga, esto significa que los ciclos aplicados con anterioridad no han causado daño en el material y que la pérdida de módulo complejo y densidad de energía disipada no implica daño sino reacomodamiento de las partículas del material, lo que es conocido como tixotropía. La propiedad fundamental que caracteriza la tixotropía es la reversibilidad, es decir, la recuperación de las propiedades pérdidas al retirar las solicitaciones sobre el material. Por lo tanto, para poder afirmar sin ningún tipo de duda que una pérdida de propiedades está asociada a un comportamiento tixotrópico es necesario realizar ensayos en los que la solicitación de carga aumente y disminuya para comprobar si existe una recuperación.

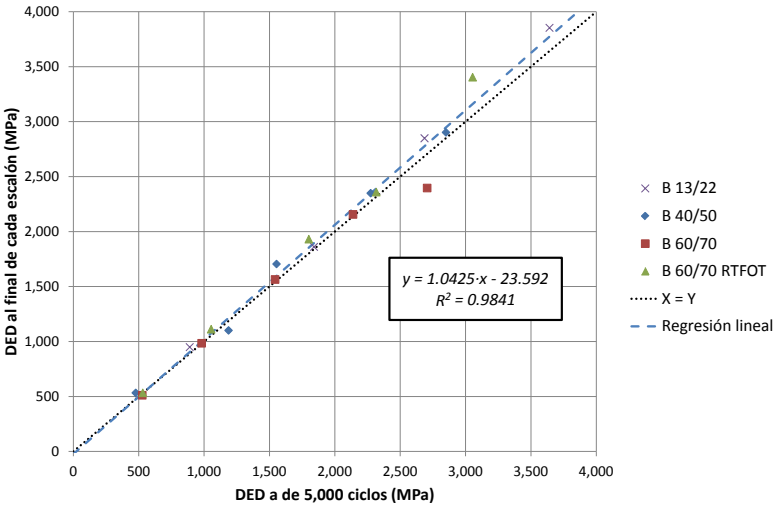


Figura 4.25: Correlación entre la densidad de energía disipada al final de cada escalón en los barridos de deformaciones con la densidad de energía disipada a 5,000 ciclos en los barridos de tiempo

4.1.5. Barridos de deformaciones alternativas

A la vista de los resultados presentados en la sección anterior, se hacía necesario diseñar un nuevo procedimiento de ensayo que permitiera determinar con certeza si la pérdida de propiedades experimentada por los ligantes era debida a daño irreversible o a efectos tixotrópicos. Para ello se requiere un tipo de ensayo que someta al ligante a niveles de carga altos y bajos alternativamente, con el objetivo de evaluar la capacidad de recuperación del material. Esto es precisamente lo que hace el ensayo de barrido de deformaciones alternativas descrito en el capítulo anterior. Todos los ensayos se llevaron a cabo a 10ºC de temperatura y una frecuencia de 10 Hz.

La primera aplicación de este tipo de ensayo, se realizó sobre el ligante B 40/50, aplicando un barrido de deformaciones ascendente hasta una deformación de 0.38 % (cinco escalones de carga) seguido de un barrido de deformaciones descendente, siguiendo el mismo esquema de escalones a la inversa, figura 4.26. Este procedimiento se aplicó dos veces dejando reposar el ligante durante 30 minutos una vez acabada la fase de descarga y antes de empezar la siguiente fase de carga. Cada una de estas fases de ensayo, compuestas por una rama de deformación ascendente y una de deformación descendente, han sido denominadas *triángulos* y se caracterizan por la el valor de la amplitud deformación máxima alcanzada durante está fase.

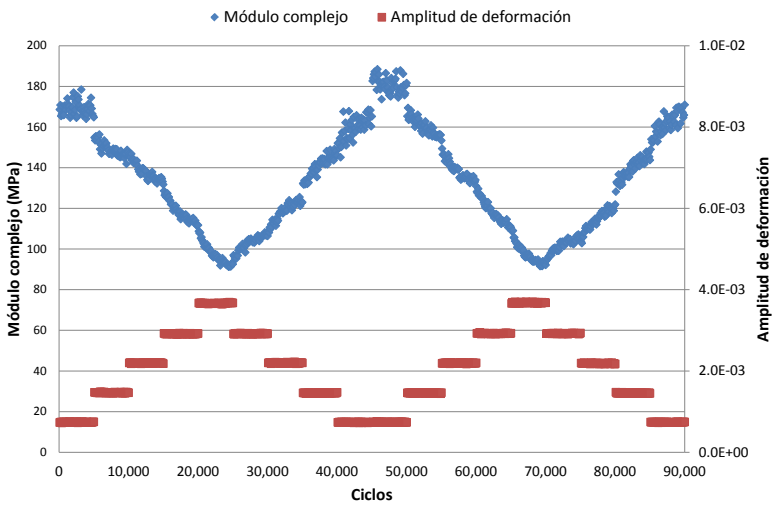


Figura 4.26: Evolución del módulo complejo en el primer ensayo de barrido de deformaciones alternativo aplicado al ligante B 40/50 a 10°C y 10 Hz.

Se observa claramente en la figura 4.26, como después de experimentar una pérdida de aproximadamente un 45 % de módulo complejo inicial (1° escalón) a una amplitud de deformación de 0.38 % (5° escalón), el ligante recupera progresivamente su módulo complejo hasta alcanzar valores muy similares al inicial en el último escalón de deformación del primer triángulo. Este hecho, por si solo, demostró que el daño producido al ligante en estos primeros cinco escalones de deformación fue nulo, y que toda la pérdida de módulo observada fue debida a su comportamiento tixotrópico. Para garantizar la veracidad de esta última afirmación, se repitió el triángulo después de dejar reposar el material durante 30 minutos, obteniendo el mismo resultado.

La prueba definitiva del comportamiento tixotrópico del ligante la proporcionó la representación gráfica de la densidad de energía disipada con el número de ciclos para el mismo ensayo, figura 4.27. En esta figura se observa como durante la rama de incremento de la amplitud de deformación la energía disminuye durante cada escalón hasta un valor de estabilización, mientras que en la rama de decremento de la amplitud de deformación este parámetro presenta un valor muy inferior e incrementa paulatinamente hasta alcanzar el mismo valor de estabilización alcanzado en la rama incremental. Este comportamiento es característico de los materiales tixotrópicos, como se introdujo en el capítulo 2 ejemplificado por la figura 2.29.

Con el objetivo de caracterizar los restantes ligantes mediante este tipo de ensayo, se modificó el procedimiento para propiciar el fallo del material al finalizar el ensayo. Para ello se elaboró un procedimiento de ensayo compuesto

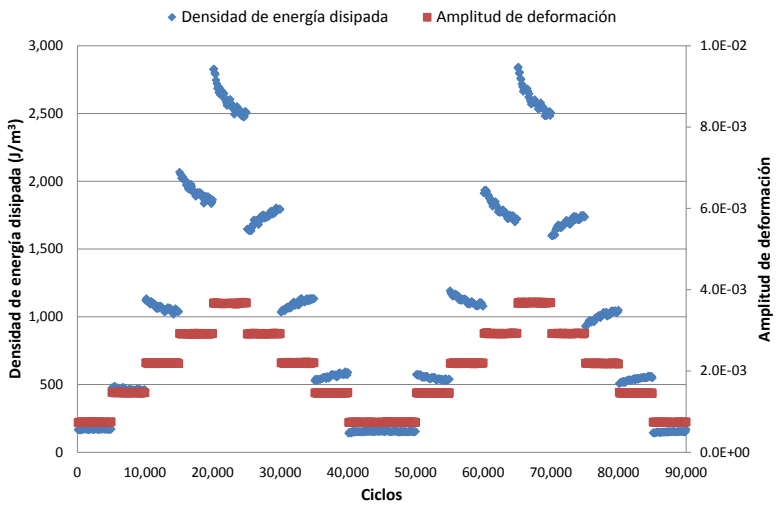


Figura 4.27: Evolución de la densidad de energía disipada en el primer ensayo de barrido de deformaciones alternativo aplicado al ligante B 40/50 a 10°C y 10 Hz.

por varios triángulos, cada uno de ellos con mayor número de escalones que el anterior y alcanzando mayores deformaciones máximas cada vez.

La figura 4.28 muestra los resultados para el ligante B 13/22. De nuevo se observa como en los dos primeros triángulos el ligante recupera la totalidad de su módulo complejo inicial, el tercer triángulo parece que empieza a causar daño al material y falla completamente en el cuarto triángulo. En este caso se puede comprobar que existe una cierta degradación que tiene que ver con el número de ciclos aplicados, ya que este mismo ligante sorpotó hasta el séptimo escalón de deformación en los ensayos de barrido de deformaciones ascendentes mientras que en esta ocasión solo alcanzó el quinto escalón de deformación.

El ligante B 60/70, figura 4.29, tuvo un comportamiento tixotrópico más marcado, ya que en los primeros cinco triángulos fue capaz de recuperar la totalidad del módulo complejo inicial. Así mismo, falló en el sexto triángulo al alcanzar el séptimo escalón de deformación, dos escalones por debajo de su deformación de fallo en los ensayos de barrido de deformaciones ascendentes.

Aunque en ambos casos, el número de ciclos de carga aplicado contribuyó a reducir la deformación de fallo, la disminución del módulo complejo debida al comportamiento tixotrópico del material fue muy superior a la debida al daño causado al ligante. Para cuantificar la pérdida de módulo complejo debida a tixotropía y a daño irreversible se elaboró la gráfica que se presenta en la figura 4.30, donde se representaron tres valores clave del módulo complejo para cada uno de los triángulos: el valor del módulo en el escalón inicial de cada

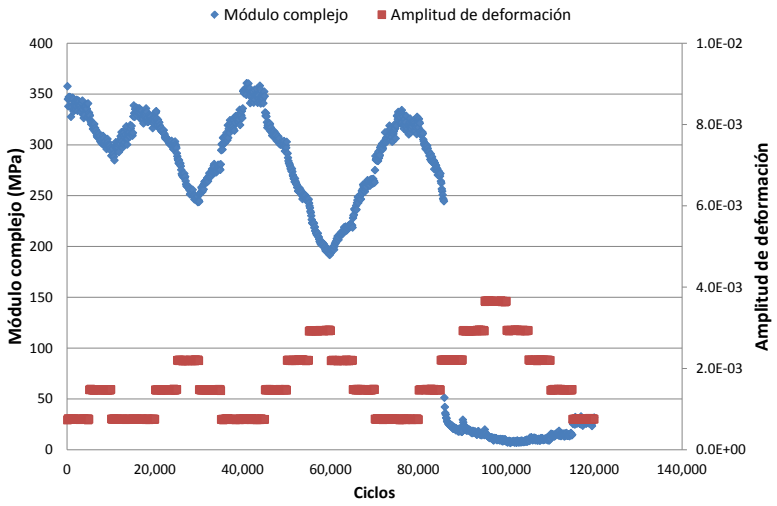


Figura 4.28: Evolución del módulo complejo en el ensayo barrido de deformaciones alternativo aplicado al ligante B 13/22 a 10°C y 10 Hz.

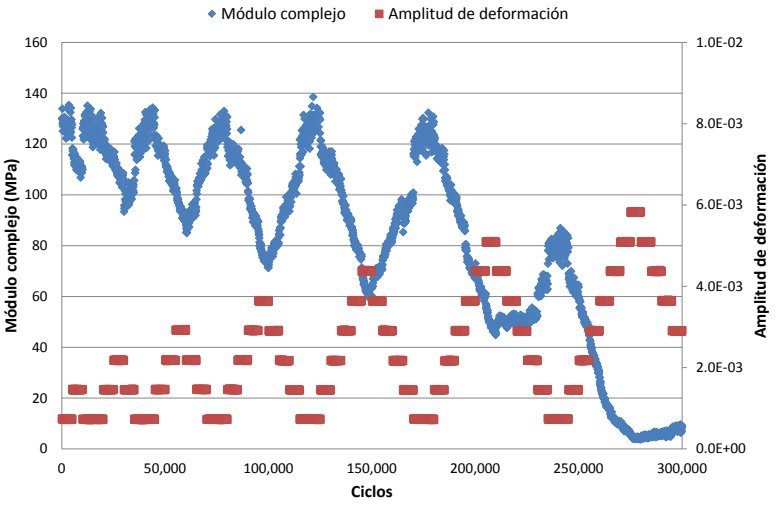


Figura 4.29: Evolución del módulo complejo en el ensayo barrido de deformaciones alternativo aplicado al ligante B 60/70 a 10°C y 10 Hz.

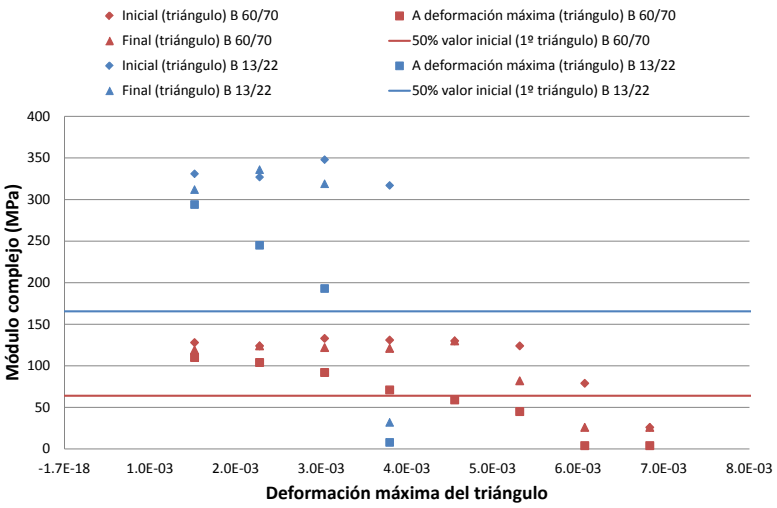


Figura 4.30: Valores del módulo complejo en el escalón inicial, a máxima deformación y en el escalón final de cada triángulo en los ensayos de barrido de deformaciones alternativas en ligantes.

triángulo a la mínima deformación (a 0.08 %), el valor a la deformación máxima alcanzada en dicho triángulo y el valor en el último escalón del triángulo, de nuevo a la mínima deformación.

La figura 4.30 muestra la pérdida de módulo debida a la tixotropía y debida al daño irreversible. Los valores representados con cuadrados hacen referencia al módulo a deformación máxima. Tomando estos valores como referencia, observamos como para el ligante B 60/70 en el quinto escalón, el módulo complejo es menor a la mitad del inicial, con lo cual se cumpliría el criterio convencional de fallo descrito en la norma UNE-EN 12697-24. Sin embargo, al disminuir la amplitud de deformación aplicada al ligante, el módulo complejo obtenido es muy cercano al inicial, con lo que el ligante estaría lejos de fallar. Por lo tanto, los valores representados con triángulos son los valores reales del módulo complejo del material, habiendo eliminado la pérdida por tixotropía del cálculo. Por otro lado, si se observa la proximidad entre los valores representados por los triángulos y los valores iniciales, se puede concluir que la pérdida de módulo complejo de los ligantes debida a la tixotropía es mucho mayor a la pérdida debida a daño irreversible.

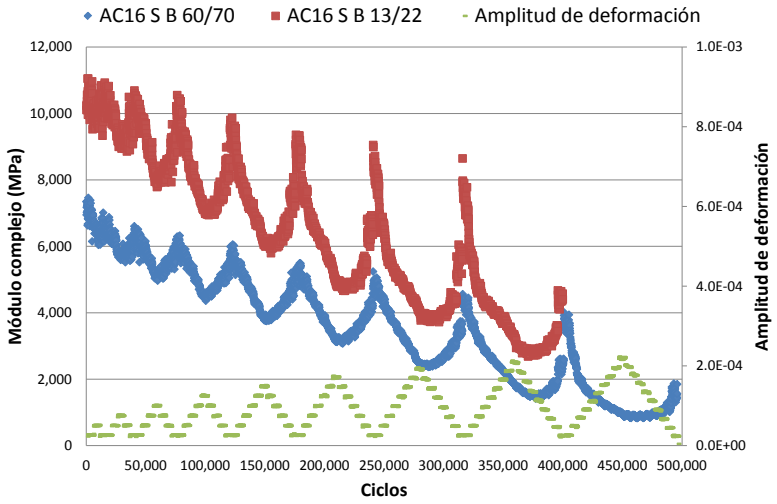


Figura 4.31: Evolución del módulo complejo en el ensayo barrido de deformaciones alternativo aplicado las mezclas fabricadas con los ligantes B 13/22 y B 60/70 a 20°C y 10 Hz.

4.2. Mezclas

4.2.1. Barridos de deformación alternativas

A la vista de los resultados obtenidos para los ligantes, se hacía necesario comprobar es las mezclas bituminosas fabricadas con estos ligantes mostraban el mismo comportamiento tixotrópico. Para ello se realizaron ensayos de barrido de deformaciones alternativas empleando el montaje experimental del ensayo EBADE para mezclas, descrito en el capítulo 3. En concreto, se ensayaron dos mezclas tipo AC16 S empleando los ligantes B 13/22 y B 60/70. Los ensayos en mezclas se realizaron a 20°C de temperatura y una frecuencia de 10 Hz.

La figura 4.31 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de barrido de deformaciones alternativas aplicados a las dos mezclas objeto del estudio.

El comportamiento de las mezclas fue ligeramente diferente al de los ligantes. Desde un primer momento se observa una pérdida del módulo complejo que no es recuperable al disminuir la amplitud de deformación aplicada. Sin embargo, en los primeros triángulos, figura 4.32, se observa como la recuperación del módulo complejo al final de los dos primeros triángulos es casi completa. A medida que avanza el ensayo, el módulo complejo al principio de cada triángulo disminuye respecto al anterior, pero cabe señalar que en la rama de descarga de cada triángulo se produce una recuperación muy importante del módulo,

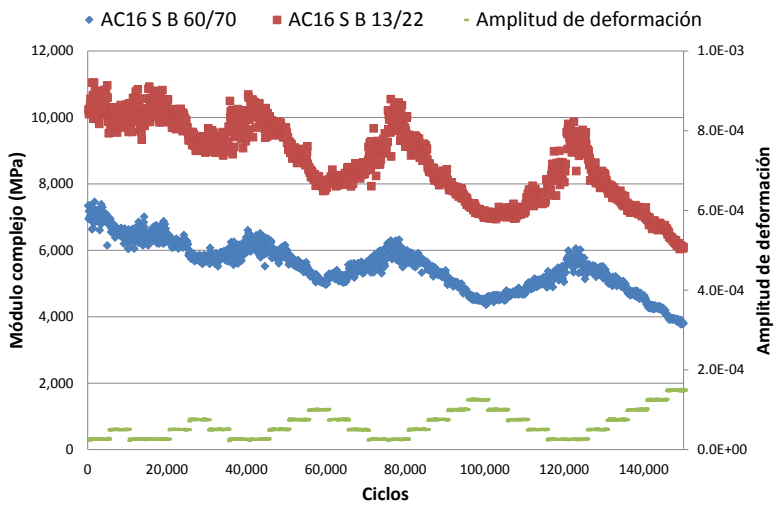


Figura 4.32: Evolución del módulo complejo en el ensayo barrido de deformaciones alternativo aplicado las mezclas fabricadas con los ligantes B 13/22 y B 60/70 a 20°C y 10 Hz. Primeros 150,000 ciclos.

figura 4.33. Esta recuperación, es mayor a la producida por el periodo de reposo de 30 minutos. En concreto, el efecto de autorreparación sólo se observa en los últimos triángulos, donde el módulo al inicio de triángulo experimenta un incremento importante respecto al módulo al final del triángulo anterior. Aun así, esta recuperación es ficticia, ya que una vez comenzado el nuevo triángulo, el módulo experimenta una pérdida muy brusca a medida que aumenta la amplitud de deformación.

En la figura 4.34 se representan los mismos valores que se graficaron para los ensayos de barrido de deformaciones alternativas llevados a cabo en ligantes en la figura 4.30.

La figura 4.34 muestra claramente como desde el primer momento existe una pérdida de módulo complejo, aun así, la diferencia entre el módulo a final de triángulo y el módulo a deformación máxima es suficientemente importante como para ser tenida en cuenta. En concreto, en el sexto triángulo ambas mezclas obtuvieron un módulo a deformación máxima menor al 50 % del valor inicial, pero ambas obtuvieron un valor muy superior al final de dicho triángulo (un 63 % del módulo inicial para la mezcla fabricada con el B 60/70 y un 65 % la mezcla fabricada con el B 13/22).

En resumen, el comportamiento de la mezcla mostró pérdidas de módulo debidas a tixotropía y a daño desde los primeros niveles de deformación. Aun así, los efectos tixotrópicos en el módulo fueron suficientemente importantes

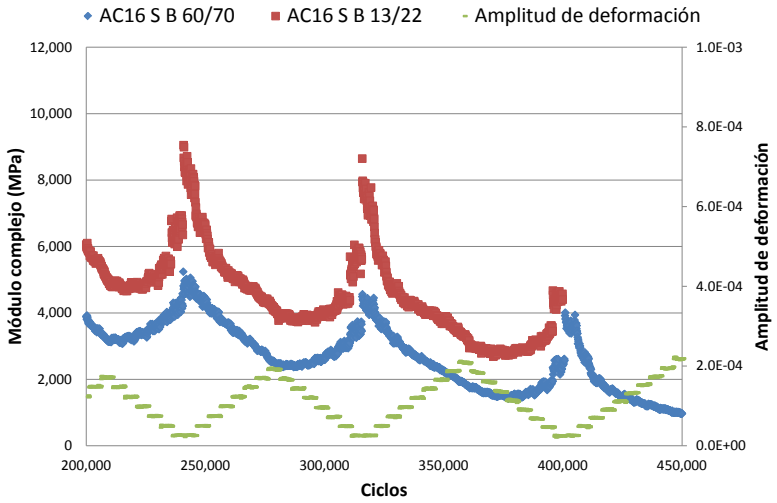


Figura 4.33: Evolución del módulo complejo en el ensayo barrido de deformaciones alternativo aplicado las mezclas fabricadas con los ligantes B 13/22 y B 60/70 a 20°C y 10 Hz. Parte final de los ensayos.

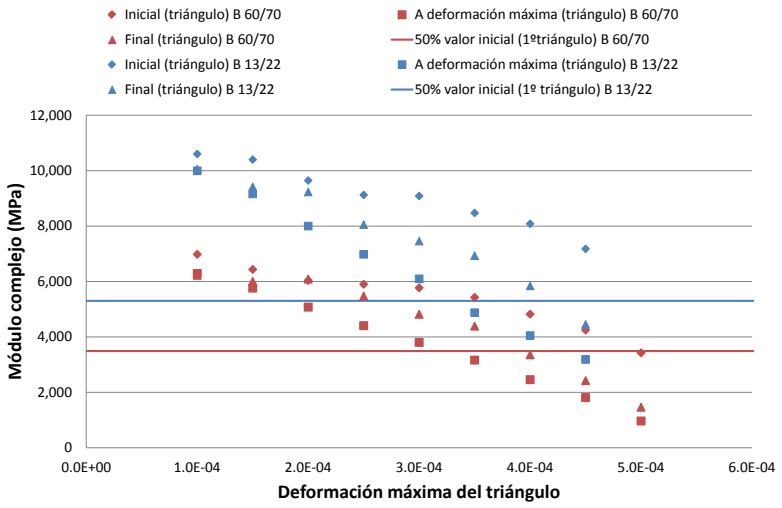


Figura 4.34: Valores del módulo complejo en el escalón inicial, a máxima deformación y en el escalón final de cada triángulo en los ensayos de barrido de deformaciones alternativas en mezclas.

como para ser tenidos en cuenta. Por lo tanto, cualquier cálculo que se realice despreciando la pérdida de módulo de la mezcla debida a la tixotropía tendrá un error asociado muy importante.

Capítulo 5

Conclusiones

En este último capítulo se resume y justifica brevemente el trabajo de investigación realizado a lo largo de esta tesis doctoral y se exponen las conclusiones que se han obtenido.

La resistencia a la fisuración por fatiga de las mezclas bituminosas depende de numerosos factores: tipo de mezcla y granulometría de los áridos, naturaleza de los áridos, tipo y contenido de ligante, huecos en mezcla, tipo de solicitación, temperatura, etc...

Dentro de la técnica de carreteras se han desarrollado distintos ensayos y criterios para evaluar y seleccionar ligantes bituminosos que proporcionen unas características idóneas a la mezcla frente al fallo por fisuración por fatiga. De entre los ensayos más universalmente admitidos, son los basados en cargas cíclicas aplicadas de forma continua a deformaciones controladas, ensayos denominados de barrido de tiempo, los más utilizados. Estos ensayos son usados para obtener las leyes de fatiga de los ligantes bituminosos.

Este tipo de ensayo presenta el inconveniente de su costo y duración y, sobre todo, como ha sido puesto de manifiesto en esta tesis doctoral, por el problema que supone determinar el fallo por fatiga de betunes modificados o betunes blandos y dúctiles. En este tipo de ensayo el fallo por fatiga se establece cuando la carga impuesta se reduce a la mitad, pero, al ensayar betunes modificados, puede ocurrir que esta pérdida tenga lugar en los primeros ciclos de carga, al acondicionarse el betún ensayado a las solicitaciones y deformaciones aplicadas, manteniendo después un esfuerzo muy superior a la asociada a su fallo.

Es por ello que, dentro del marco de esta tesis doctoral, se ha desarrollado un nuevo procedimiento de ensayo para evaluar las características de los ligantes bituminosos frente al fallo por fatiga. Este ensayo consiste en un ensayo de tracción-compresión en donde una probeta cilíndrica de ligante bituminoso es sometida a la aplicación de una carga cíclica cuya amplitud aumenta cada 5,000 ciclos. Este tipo de ensayo es conocido como barrido de deformaciones, de ahí su nombre EBADE (Ensayo de BArrido de DEformaciones).

Aunque el ensayo se puede realizar a diferentes temperaturas y frecuencias, la gran mayoría de los ensayos se realizaron a 10ºC y 10Hz. La frecuencia de 10Hz es común en este tipo de ensayos y está relacionada con la velocidad de los vehículos y de la aplicación de cargas en el firme. La temperatura de 10ºC fue seleccionada con el fin de poder obtener probetas consistentes que permitiesen su manejo sin deformarse.

El ensayo comienza con una deformación de 0.076 % y se va incrementando en 0.076 % cada 5,000 ciclos hasta que se produce el fallo de la probeta de ligante. El fallo de la probeta corresponde con una caída pronunciada de la carga aplicada.

Del ensayos se obtienen los siguientes resultados:

- Evolución de la carga aplicada con el número de ciclos y nivel de deformación impuesta.
- Evolución del módulo del betún con el número de ciclos y nivel de deformación impuesta.
- Evolución de la densidad de energía disipada por ciclo en función del número de ciclos y nivel de deformación impuesta.

Estas curvas se caracterizan por lo siguiente:

- En el caso del esfuerzo y de la energía disipada, por aumentar al incrementar el escalón de deformación e ir disminuyendo durante la aplicación de los 5,000 ciclos correspondientes a cada escalón de deformación. No obstante, se aprecia que este decremento es menor o incluso inexistente para niveles de deformación bajos, y se hace muy pronunciado a medida que el ensayo llega a los niveles de deformación de fallo, en donde, tanto la carga como la energía caen de forma pronunciada.
- Es precisamente esta pérdida significativa de la energía disipada lo que se ha tomado para establecer el nivel de deformación de fallo del ligante. Se define nivel de deformación de fallo aquel en donde la energía disipada desciende al 50 % del valor máximo obtenido en la curva de energía disipada-números de ciclos y niveles de deformación.
- Respecto a la evaluación del módulo, se aprecia que este parámetro decrece a medida que se incrementan los niveles de deformación, pero para niveles bajos de deformación el valor del módulo tiende a estabilizarse durante la aplicación de los 5,000 ciclos de carga mientras que para niveles de deformación altos continua disminuyendo de forma progresiva al aplicar los diferentes ciclos.

Como procedimiento de ensayo, el ensayo EBADE presenta una buena repetibilidad. En concreto, la densidad de energía disipada máxima presenta un coeficiente de variación de 5.5 %, el módulo inicial de un 12 %, la tensión máxima de un 6.5 % y la deformación de fallo un 10.8 %. Además, el ensayo se caracteriza

por su sensibilidad para diferenciar el comportamiento de los diferentes betunes. Los resultados ponen de manifiesto la diferencia de comportamiento de éstos, según su procedencia y penetración, resaltando la diferencia de comportamiento entre betunes convencionales y modificados que, en ocasiones, los ensayos de barrido de tiempo no son capaces de mostrar.

A la hora de su aplicación para la caracterización y evaluación de ligantes bituminosos frente al fallo por fisuración de fatiga de las mezclas bituminosas se propone el uso de dos parámetros: el módulo inicial de la mezcla determinado en el primer escalón del ensayo y la deformación de rotura. Con ambos parámetros podemos seleccionar el betún que mejor respuesta presenta en la mezcla frente al fallo de fatiga.

- El módulo es un parámetro que está asociado normalmente a la consistencia del betún y a una mayor o menor penetración. Ésta es normalmente seleccionada para la fabricación de la mezcla en función de la temperatura máxima donde va a ser ubicada.

- Para módulos similares, cuanto mayor sea la deformación de fallo mejor será la respuesta a fatiga de un ligante.

Esta conclusión ha sido puesta de manifiesto al comparar ensayos cíclicos de fatiga de barrido de deformaciones frente a ensayos cíclicos de fatiga de barrido de tiempo.

En la comparación de los resultados obtenidos en la evaluación de varios ligantes por ambos procedimientos se puede constatar la excelente correlación entre la deformación de fallo obtenida en el ensayo EBADE y la deformación correspondiente a los $1 \cdot 10^6$ aplicaciones de carga calculados a partir de la ley de fatiga obtenida por el procedimiento de barrido de tiempo. Estos resultados muestran la idoneidad del procedimiento propuesto para la evaluación de los ligantes bituminosos frente al fallo por fatiga por su mayor rapidez, sencillez y por no tener el inconveniente de los ensayos de barrido de tiempo en la caracterización de betunes dúctiles y modificados.

Otra de las conclusiones obtenidas, a raíz de comparar los ensayos de barrido de tiempo con los de barrido de deformaciones, es que los valores del módulo y de la densidad de energía disipada en los cuales se estabilizaba el ensayo a una amplitud de deformación dada, son los mismos para ambos tipos de ensayos. Este comportamiento se observó hasta valores de amplitud de deformación de 0.46 % ($4.6 \cdot 10^{-3}$). En concreto, la correlación entre el módulo después de 5,000 ciclos en los ensayos de barrido de tiempo a amplitud de deformación constante y el módulo al finalizar el escalón correspondiente a esa misma amplitud de deformación en los ensayos de barrido de deformaciones obtuvo un coeficiente de correlación de 0.98 y estuvo muy cerca de la recta $X = Y$, que marcaría la total igualdad entre los valores, figura 4.24. Esto implica que:

- La tensión final estable a la que se ve sometido el betún durante un ensayo de barrido de tiempo sólo depende del nivel de deformación aplicado.

- La pérdida de módulo que se registra en el ensayo en los ciclos iniciales de carga es debido a una adaptación del material a los niveles de deformación del ensayo, pero no supone un deterioro del mismo.

Con objeto de mostrar que la pérdida de módulo del ligante bituminoso en los primeros escalones del ensayo es debida a una respuesta no lineal del material y a su comportamiento tixotrópico se aplicó el ensayo EBADE en su modalidad de barrido de deformaciones alternativas, aumentando inicialmente las deformaciones aplicadas hasta llegar a un determinado nivel para luego ir descendiendo también progresivamente. Las conclusiones obtenidas fueron las siguientes:

- La variación del módulo con la variación de la amplitud de deformación impuesta no está asociada a un proceso de daño irreversible sino a la tixotropía del ligante, variación reversible de las propiedades de un fluido con la variación del flujo, o velocidad de aplicación de carga.
- La recuperación no puede ser asociada con una auto-reparación del betún, *healing*, ya que los ensayos se realizaron sin ningún tipo de reposo entre los ciclos de barrido ascendentes y el descendiente.
- Cuando la amplitud de deformación impuesta llega a los niveles de deformación de fallo del betún, el ligante comienza a perder resistencia y módulo de una forma más acusada, fallo, y ya no recupera las propiedades iniciales al regresar a los escalones de deformación más bajos.

Por último, para comprobar como de importante era el comportamiento tixotrópico de la mezcla bituminosa, se aplicó el ensayo EBADE en su modalidad de barrido de deformaciones alternativas. Si bien la recuperación del módulo y la densidad de energía disipada no fue total como en el caso de los ligantes, fue suficientemente importante. En algunos casos se alcanzó una recuperación superior al 90 % del módulo inicial después de haberse reducido por debajo del 60 % a deformaciones mayores. Por lo tanto, se concluye que la tixotropía y los efectos no-lineales son de vital importancia en el comportamiento de la mezcla bituminosa y que de ninguna manera pueden ser omitidos a la hora de modelizar este material.

En resumen, el procedimiento EBADE se ha mostrado como una alternativa al análisis clásico basado en las leyes de fatiga. Permite clasificar ligantes según su resistencia a fatiga sin necesidad de realizar multitud de ensayos a diferentes solicitaciones de carga, con la reducción de tiempo de ensayo que eso implica. Así mismo ha demostrado la gran influencia que tiene la tixotropía en el comportamiento de los ligantes, y que ésta no puede ser pasada por alto en la caracterización del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas.

Capítulo 6

Futuras líneas de investigación

Esta tesis doctoral ha pretendido ser un primer paso hacia la implementación de una nueva metodología para caracterizar el comportamiento a fatiga de los materiales bituminosos, de una manera más rápida y sencilla a las técnicas existentes en la actualidad. Para continuar con esta linea de investigación se proponen diferentes trabajos que de ser llevados a cabo deberían permitir cumplir con este objetivo.

- *Implementación en másticos*: Actualmente, varios autores [14, 27] destacan la importancia de estudiar las propiedades del mástico bituminoso, matriz formada por el ligante y las partículas de árido de menor tamaño (*filler*), y especialmente la influencia que éste tiene en el comportamiento a fatiga de la mezcla. Por ello sería de especial interés adaptar el procedimiento EBADE para la caracterización de este componente bituminoso. Dicha adaptación no presenta mayores dificultades y en la actualidad el Laboratorio de Caminos de la Universitat Politècnica de Catalunya está trabajando en ello.

- *Implementación en mezclas*: El siguiente paso natural sería realizar el ensayo EBADE directamente sobre probetas de mezcla bituminosa. Existe un ensayo desarrollado por el mismo Laboratorio que permite realizar ensayos uniaxiales de tracción-compresión llamado CTD (Cataluña Tracción Directa). Por lo tanto la aplicación del procedimiento EBADE a mezclas sería directa. Actualmente ya se han realizado varios estudios al respecto.

- *Obtención de leyes de fatiga a partir del ensayo EBADE*: Este sería el escalón final a superar. Si fuera posible relacionar un ensayo de barrido de deformaciones con la ley de fatiga del material, el ahorro de tiempo y dinero en el proceso de caracterización del comportamiento a fatiga de los materiales bituminosos sería mayúsculo. Para ello sería necesario realizar ensayos de barrido de tiempo y deformaciones a un gran número de mezclas, ligantes y másticos, y hallar la relación que existe entre la ley

de fatiga y los parámetros obtenidos en los ensayos EBADE. En esta tesis doctoral ha quedado probado que esta relación existe, relación entre ε_6 y deformación de fallo, y en estos momentos ya se está trabajando en ello.

- *Obtención de curvas maestras de fatiga*: La sencillez y rapidez del ensayo hace posible el análisis de diferentes variables de ensayo en relativamente poco espacio de tiempo. Por lo tanto, sería de gran interés realizar ensayos a diferentes velocidades de carga (frecuencias) y diferentes temperaturas para así obtener el comportamiento de los materiales bituminosos en un amplio espectro de condiciones, es decir, obtener la curva maestra de fatiga del material.

Capítulo 7

Referencias

[1] UNE-EN 12697-24:2006 + A1:2007. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 24: Resistencia a la fatiga (2007).

[2] UNE-EN 12607-1:2007. Bitumen and bituminous binders. Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air. Part 1: RTFOT method (2007).

[3] AASHTO T 240-09: Standard method of test for effect of heat and air on a moving film of asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test) (ASTM Designation: D 2872-04) (2009).

[4] AASTHO. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures (2002).

[5] G. D. Airey, M. Mohammed, A. C. Collop, C. J. Hayes y T. Parry. Linear viscoelastic behaviour of polyacrylate binders and bitumen blends. *Internation Journal on Road Materials and Pavement Design* **9**, 13–35 (2008).

[6] G. D. Airey, B. Rahimzadeh y A. C. Collop. Linear viscoelastic limits of bituminous binders. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* **71**, 160–196 (2002).

[7] G. D. Airey, B. Rahimzadeh y A. C. Collop. Linear rheological behavior of bituminous paving materials. *Journal of Materials in Civil Engineering* **16**(3), 212–220 (2004).

[8] J. Alonso. "Estudio del proceso de deformación y agrietamiento por fatiga de mezclas bituminosas sometidas a carga cíclica". Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya (2005).

[9] D. A. Anderson, D. W. Christensen, H. U. Bahia, R. Dongre, M. G. Sharma, C. E. Antle y J. Button. Binder characterisation, volume 3: Physical properties. Informe técnico, SHRP-A-369, Strategic Highways Research Program, National Research Council, Washington, D.C. (1994).

[10] D. A. Anderson, Y. M. Le Hir, M. O. Marasteanu, J. Planche y D. Martin. Evaluation of fatigue criteria for asphalt binders. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **1766**, 48–56 (2001).

[11] S. Bagrodia, R. Pisipati, G. L. Wilkes, R. F. Storey y J. P. Kennedy. Melt rheology of ion-containing polymers. I. Effect of molecular weight and excess neutralizing agent in model elastomeric sulfonated polyisobutylene-based ionomers. *Journal of Applied Polymer Science* **29**(10), 3065–3073 (1984).

[12] H. U. Bahia, H. Zhai, K. Bonnetti y S. Kose. Non-linear viscoleastic and fatigue properties of asphalt binders. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* **68**, 1 (1999).

[13] H. U. Bahia, H. Zhai, M. Zeng, Y. Hu y P. Turner. Development of binder specification parameters based on characterization of damage behavior. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* **70**, 442–470 (2001).

[14] H.U. Bahia y R. Velasquez. U.S. efforts on asphalt mastic modeling and characterization. En "ISAP- 2nd International Workshop on Asphalt Mastics" (2012).

[15] N. Boussad, P. DesCroix y A. Dony. Prediction of mix modulus and fatigue law from binder rheology properties. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* **65**, 40 (1996).

[16] G.W. Bowen, J.M. Broadbent y K. Walters. Some suggestions for new rheometer designs: III. Anomalous results for highly viscous fluids. *Journal of Physics D: Applied Physics* **6**, 909–921 (1973).

[17] E. Chailleux, D. Bodin, C. de La Roche, M. Leguern y N. Vignard. Fatigue behaviour of bitumen in tension-compression loading mode: Rheological analysis and comparison with mix fatigue. En "Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials" (2009).

[18] R. M. Christensen. "Theory of Viscoelasticity". Dover Publications, segunda edición (1982).

[19] J. H. Collins, M. G. Bouldin, R. Gelles y A. Berker. Improved performance of paving asphalts by polymer modification. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* **60**, 43–79 (1991).

[20] C. De La Roche y P. Marsac. Caractérisation expérimentale de la disipation thermique dans un enrobé bitumineux sollicité en fatigue. En "First International Eurobitume and Euroasphalt Congress" (1996).

[21] R. Delgadillo y H. U. Bahia. Rational fatigue limits for asphalt binders derived from pavement analysis. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* **74**, – (2005).

[22] H. Di Benedetto, C. De La Roche y L. Francken. Fatigue of bituminous mixtures: Different approaches and rilem interlaboratory tests. En "Mechanical Tests for Bituminous Materials" (1997).

[23] H. Di Benedetto, F. Olard, C. Sauzéat y B. Delaporte. Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: from binders to mixes. *Internation Journal on Road Materials and Pavement Design* **5**, 163–202 (2004).

[24] H. Di Benedetto, A. A. Soltani y P. Chaverot. Fatigue damage for bituminous mixtures. En "Mechanical Tests for Bituminous Materials" (1997).

[25] M. M. Dumoun, L. A. Utracki y J. Lara. Rheological and mechanical behavior of the UHMWPE/MDPE mixtures. *Polymer Engineering & Science* **24**(2), 117–126 (1984).

[26] F. J. Gravetter y L. B. Wallnau. "Essentials of Statistics for the Behavioral Sciences". Thomson Learning Inc. (2005).

[27] F. Hammoum. European perspective of asphalt mastic characterization. En "ISAP- 2nd International Workshop on Asphalt Mastics" (2012).

[28] J. A. Hernández Noguera. "Estudio de la cohesión y la tenacidad del betún y su posible efecto en el comportamiento a fatiga de la mezcla". Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya (2008).

[29] C. Hintz, R. Velasquez, C. Johnson y H. Bahia. Modification and validation of the linear amplitude sweep test for binder fatigue specification. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **2207**, 99–106 (2011).

[30] Asphalt Institute. "Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing Superpave Series No. 1 (SP-1)". Asphalt Institute (2003).

[31] C. M. Johnson. "Estimating asphalt binder fatigue resistance using an accelerated test method". Tesis Doctoral, University of Wisconsin – Madison (2010).

[32] Y. Kim, H. J. Lee, D. N. Little y Y. R. Kim. A simple testing method to evaluate fatigue fracture and damage performance of asphalt mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* **75**, 755–788 (2006).

[33] Y. R. Kim y D. N. Little. Evaluation of healing in asphalt concrete by means of the theory of nonlinear viscoelasticity. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **1228**, 198–210 (1988).

[34] Y. R. Kim, D. N. Little y R. L Lytton. Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering* **15**, 75–83 (2003).

[35] M.E. Kutay, N.H. Gibson y J. Youtcheff. Conventional and viscoelastic continuum damage (VECD) based fatigue analysis of polymer modified asphalt pavements. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* **77**, 395–434 (2008).

[36] M.E. Kutay, N.H. Gibson, J. Youtcheff y R. Dongre. Use of small samples to predict fatigue lives of field cores: Newly developed formulation based on viscoelastic continuum damage theory. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **2127**, 90–97 (2009).

[37] H. J. Lee y Y. R. Kim. Viscoelastic continuum damage model of asphalt concrete with healing. *Journal of Engineering Mechanics* **124**(11), 1224–1232 (1998).

[38] A. D. McNaught y A. Wilkinson. "IUPAC Compendium of Chemical Terminology". IUPAC (1997).

[39] J. Mewis y J. W. Norman. Thixotropy. *Advances in Colloid and Interface Science* **147-148**, 214–227 (2009).

[40] S. W. Park, Y. R. Kim y R. A. Schapery. A viscoelastic continuum damage model and its application to uniaxial behavior of asphalt concrete. *Mechanics of Materials* **24**, 241–255 (1996).

[41] S. W. Park y R. A. Schapery. Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions. Part I - A numerical method based on prony series. *International Journal of Solids and Structures* **36**, 1653–1675 (1999).

[42] P. S. Pell, P. F. McCarthy y R. R. Gardner. Fatigue of bitumen and bituminous mixes. *International Journal of Mechanical Sciences* **3**(4), 247–248 (1961).

[43] J. C. Petersen, R. E. Robertson, J. F. Branthaver, P. M. Harnsberger, J. J. Duvall, S. S. Kim, D. A. Anderson, D. W. Christiansen, H. U. Bahia, R. Dongre, C. E. Antle, M. G. Sharm, J. W. Button y C. J. Glover. Binder characterization and evaluation volume 4: Test methods. Informe técnico, SHRP-A-370, Strategic Highways Research Program, National Research Council, Washington, D.C. (1994).

[44] F. E. Pérez Jiménez y A. Bardesi Ouré-Echevarría. "Manual para la caracterización de ligantes y másticos bituminosos". Repsol YPF, primera edición (2006).

[45] A. C. Pronk. Evaluation of the dissipated energy concept for the interpretation of fatigue measurements. Informe técnico, Road and Hydraulics Engineering Division, the Netherlands (1995).

[46] B. D. Prowell, E. R. Brown, R. M. Anderson, J. S. Daniel, A. K. Swamy, H. Von Quintus, S. Shen, S. H. Carpenter, S. Bhattacharjee y S. Maghsoodloo. NCHRP Report 646: Validating the fatigue endurance limit for hot mix asphalt. Informe técnico, Transport Research Board (2010).

[47] R. Reese. Properties of aged asphalt binder related to asphalt concrete fatigue life. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* **66**, 604 (1997).

[48] O. J. Reyes Ortiz. "Analisis del fallo a fatiga de ligantes hidrocarbonados. Parámetros que definen su comportamiento". Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya (2009).

[49] J. Van Rompu, H. Di Benedetto, G. Gauthier y T. Gallet. New fatigue test on bituminous binders and mastics using an annular shear rheometer prototype and waves propagation. En "Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials" (2009).

[50] R. A. Schapery. Correspondence principles and a generalized J-integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media. *International Journal of Fracture* **25**, 195–223 (1984).

[51] R. A. Schapery. A theory of mechanical behaviour of elastic media with growing damage and other changes in structure. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **38**, 215–253 (1990).

[52] W. Schütz. A history of fatigue. *Engineering Fracture Mechanics* **54**(2), 263–300 (1996).

[53] S. Shen, H. M. Chiu y H.Huang. Fatigue and healing in asphalt binders. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **1**, 1–15 (2009).

[54] Z. Si, D. N. Little y R. L. Lytton. Characterization of microdamage and healing of asphalt concrete mixtures. *Journal Of Materials In Civil Engineering* **14**(6), 461–470 (2002).

[55] A. Somwangthanaroj. Rheology and polymer characterization. Course presentation (Sept 2010).

[56] A. A. Tayebali, J. A. Deacon, J. S. Coplantz, J. T. Harvey y C. L. Monismith. Fatigue response of asphalt-aggregate mixes: Part I: Test method selection. Informe técnico, Asphalt Research Program. Institute of Transportation Studies. University of California, Berkeley. (1994).

[57] A. V. Tobolsky. Stress relaxation studies of the viscoelastic properties of polymers. *Journal of Applied Physics* **27**, 673–685 (1956).

[58] B. W. Tsai y C. L. Monismith. Influence of asphalt binder properties on the fatigue performance of asphalt concrete pavements. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* **74**, 733–790 (2005).

[59] L. A. Utracki, B. D. Favis y B. Fisa. Dynamic and steady state flow of polypropylene/mica systems. *Polymer Composites* **5**(4), 277–288 (1984).

[60] G. A. Valdés. "Evaluación del proceso de fisuración en las mezclas bituminosas mediante el desarrollo de un nuevo ensayo experimental - Ensayo Fénix -". Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya (2011).

[61] M. L. Williams, R. F. Landel y J. D. Ferry. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids. *Journal of the American Chemical Society* **77**, 3701–3707 (1955).

[62] M. W. Witczak y J. Bari. Development of a master curve (E*) database for lime modified asphaltic mixtures. Informe técnico, Arizona State University Research Project (2004).

Capítulo 8

Anejos

En esta sección se adjuntan los cuatro artículos publicados en revistas indexadas con factor de impacto, relacionados con esta tesis doctoral.

El primero de ellos, *Application of a strain sweep test to assess fatigue behavior of asphalt binders*, aceptado para publicación en *Construction and Building Materials* contiene el proceso de calibración descrito en la sección 4.1.1

El siguiente artículo, *Differentiating between damage and thixotropy in asphalt binder's fatigue tests*, publicado en 2012 en *Construction and Building Materials* analiza los resultados mostrados en las secciones 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4 y 4.1.5. Se comparan los resultados de las leyes de fatiga convencionales de los ligantes con el nuevo procedimiento descrito, y finalmente se discute si la disminución del módulo complejo tiene que ver con daño irreversible o con un comportamiento viscoelástico no lineal del ligante. Para ello se implementa el ensayo de barrido de deformaciones alternativas.

El tercer artículo presentado, *Damage and thixotropy in asphalt mixture and binder fatigue tests*, aceptado para publicación en *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, compara parte de los resultados presentados en el anterior artículo con los resultados obtenidos para mezclas bituminosas, sección 4.2. Este artículo fue nominado para el premio K. B. Woods 2012, galardón que otorga el organismo del *Transportation Research Board* al mejor artículo en el área de diseño y construcción. Menos del 1 % de los artículos presentados al congreso anual son nominados para este premio.

En el último artículo presentado, *Effect of thermal stresses on fatigue behavior of bituminous mixes*, publicado en 2011 en *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, se empleó la configuración del ensayo EBADE en mezclas para evaluar la influencia de las tensiones térmicas en la resistencia a fatiga de las mezclas bituminosas. Este estudio no está incluido en la descripción de resultados de esta tesis doctoral, pero su relación con ella es directa y por ello se añade en esta sección.

Nota bibliográfica: Los artículos citados que componen este capítulo ocupan las páginas 127- 162 de la tesis doctoral. Los derechos del editor están protegidos por ley y no se pueden publicar en acceso abierto.

A continuación indicamos la página web del editor y el DOI de los trabajos.

1 Application of a strain sweep test to assess fatigue behavior of asphalt binders
http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812004515

DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.06.059

2 Differentiating between damage and thixotropy in asphalt binder's fatigue tests
http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811007884

DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.098

3 Damage and thixotropy in asphalt mixture and binder fatigue tests,
http://amonline.trb.org/20q9i7/

4 Effect of thermal stresses on fatigue behaviour of bituminous mixes
http://trb.metapress.com/content/n167147363016346/
DOI 10.3141/2210-10