

# IMPORTANCIA DE LOS PERIODOS DE REPOSO EN EL COMPORTAMIENTO BAJO CARGAS CÍCLICAS DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS

Ramón Botella<sup>1</sup>, Félix E. Pérez Jiménez<sup>2</sup>, Ebrahim Riahi<sup>3</sup>, Teresa López-Montero<sup>4</sup>, Rodrigo Miró<sup>5</sup>  
y Adriana H. Martínez<sup>6</sup>

Universitat Politècnica de Catalunya – BarcelonaTech  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental  
C/ Jordi Girona 1-3, B1 201

08034 Barcelona, España

<sup>1</sup> ramon.botella@upc.edu

<sup>2</sup> edmundoperez@upc.edu

<sup>4</sup> teresa.lopez@upc.edu

<sup>5</sup> r.miro@upc.edu

<sup>6</sup> adriana.martinez@upc.edu

Université de Limoges, GEMH,

EA 3178

19300 Egletons, Francia

<sup>3</sup> ebrahim.riahi@unilim.fr

## Resumen

Durante su vida útil los materiales que componen los firmes están expuestos a las cargas del tráfico, que tienen un marcado carácter cíclico. Las mezclas bituminosas se caracterizan por presentar un comportamiento muy complejo cuando se someten a este tipo de cargas debido a la coexistencia de fenómenos que pueden cambiar las propiedades de estos materiales de manera reversible e irreversible. El hecho de que se produzcan cambios reversibles e irreversibles en las propiedades de las mezclas, otorga especial importancia a la secuencia en que las cargas actúen sobre el firme, o dicho de otra manera, a los periodos de reposos que se intercalen entre las cargas cíclicas.

El objetivo de este trabajo es evaluar los fenómenos reversibles que tienen lugar cuando se aplican cargas cíclicas en los materiales bituminosos y como esta reversibilidad se ve afectada con la introducción de periodos de reposos en ensayos cíclicos. Se ha adaptado el ensayo de barrido de deformaciones conocido como EBADE para diferenciar fenómenos reversibles de irreversibles y se ha monitorizado la evolución de la temperatura interna del material durante este ensayo. Se ha demostrado que debido al cambio de la temperatura, los periodos de reposo afectan directamente a la vida a fatiga del material.

**Palabras Clave:** mezcla bituminosa, periodos de reposo, fatiga.

## 1 Introducción

El comportamiento bajo cargas cíclicas de las mezclas bituminosas es de gran interés para los técnicos de pavimentos. Durante su vida útil el firme se ve sometido a este tipo de cargas, y por lo tanto conocer la respuesta de los materiales que lo componen en estas circunstancias es de vital importancia.

Desafortunadamente, el comportamiento de los materiales bituminosos bajo cargas cíclicas es muy complejo. El elevado retraso temporal que existe entre la aplicación de la carga y la

48 respuesta del material complica cualquier tipo de modelo de comportamiento que se pretenda  
49 emplear para caracterizar el material. En primer lugar, dicho retraso, conocido como desfase y  
50 caracterizado por el ángulo de fase, provoca una disipación de energía que es característica del  
51 material. Esta energía, conocida como densidad de energía disipada, a partir de ahora DED, ha  
52 sido ampliamente estudiada por la comunidad científica dedicada a los pavimentos bituminosos  
53 [1-5]. Otra consecuencia del elevado ángulo de fase que presentan estos materiales es el tipo de  
54 curva de evolución de módulo que muestran cuando son sometidos a ensayos cíclicos de barrido  
55 de tiempo (amplitud de sollicitación constante), caracterizada por tres fases bien diferenciadas  
56 [6]:

- 57 • Fase I: descenso rápido de la rigidez del material
- 58 • Fase II: descenso lineal de la rigidez del material
- 59 • Fase III: descenso rápido y repentino de la rigidez del material

60

61 La definición de estas 3 fases es fundamental para determinar en qué momento el material ha  
62 fallado, ya que debido a su elevada ductilidad, estos materiales no muestran un fallo claro  
63 cuando son sometidos a ensayos cíclicos a deformaciones relativamente bajas. Típicamente, se  
64 asocia el comienzo de la fase III como el fallo del material; sin embargo, con el objetivo de  
65 sistematizar y normalizar el proceso de hallar el número de ciclos hasta el fallo, se suele utilizar  
66 el criterio de fallo basado en la reducción del 50% del módulo inicial. Este criterio se basa en la  
67 hipótesis de que todo descenso de módulo observado corresponde a daño irreversible del  
68 material.

69 Recientemente, se ha empezado a valorar la posibilidad de que otros fenómenos diferentes al  
70 daño puedan contribuir a disminuir la rigidez del material durante los ensayos cíclicos. Existen  
71 diferentes trabajos publicados que han intentado cuantificar la contribución al descenso del  
72 módulo de la tixotropía, el calentamiento interno y la no-linealidad asociada a la aplicación de  
73 deformaciones elevadas [7-11].

74 La tixotropía y los efectos no lineales asociados a amplitudes de deformación elevadas son  
75 difíciles de cuantificar; sin embargo el calentamiento interno se puede medir  
76 experimentalmente. Si además se conocen las propiedades térmicas del material, es decir, como  
77 varía su rigidez con la temperatura, se puede cuantificar fácilmente qué cantidad de la  
78 disminución total del módulo tiene que ver sólo con el cambio de temperatura del material.

79 Estos efectos tienen en común que, a diferencia del daño, son reversibles. Esto implica que  
80 un descenso en la sollicitación al material, como puede ser el caso de un periodo de reposo,  
81 puede revertir el descenso de módulo asociado con estos fenómenos. La principal consecuencia  
82 de esto es que el número de ciclos que el material puede soportar hasta el fallo, a una cierta  
83 sollicitación depende fuertemente de la secuencia en la que se aplique dicha sollicitación. En  
84 otras palabras, una disminución en la sollicitación, o un periodo de reposo, puede contribuir a  
85 alargar la vida a “fatiga” del material de una manera muy significativa. La situación que se  
86 produce en un pavimento real es más parecida a la anteriormente descrita que a la aplicación  
87 continua a frecuencia constante de una misma sollicitación y, por ello, es de importancia capital  
88 cuantificar el efecto de estos fenómenos reversibles en los materiales que componen el firme.

89 Este trabajo presenta un estudio realizado para cuantificar el calentamiento debido a la  
90 disipación viscosa característica de los betunes asfálticos, mediante una adaptación del EBADE  
91 (Ensayo de BArrido de DEformaciones) especialmente diseñada para dicho efecto [12].

## 92 **2 Métodos y materiales**

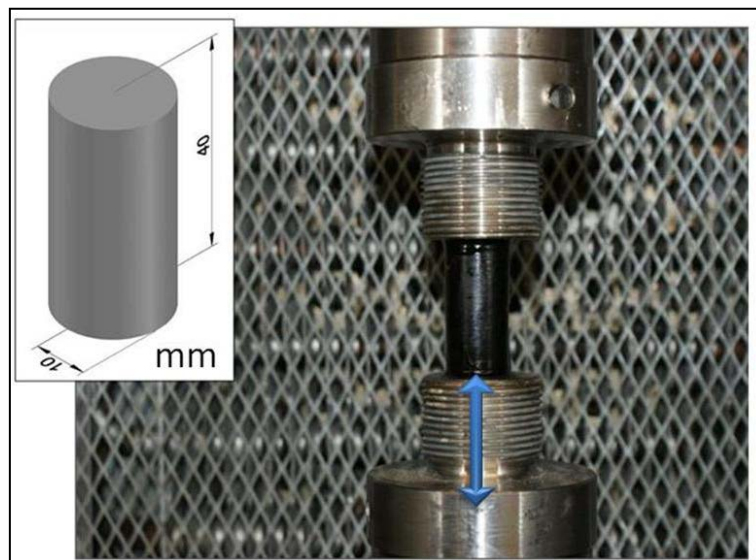
### 93 **2.1 EBADE**

94 El EBADE (Ensayo de BArrido de DEformaciones) es un ensayo cíclico uniaxial de tensión-  
95 compresión en el que se aplica una amplitud de deformación variable, Figura 1 [12]. En  
96 concreto, la amplitud de deformación aumenta en una cantidad fija cada 5.000 ciclos. En su  
97 modalidad destinada a betunes, el ensayo comienza a una deformación de 760

98 microdeformaciones y aumenta en la misma cantidad cada 5.000 ciclos. Cada una de las etapas  
 99 del ensayo durante las cuales se aplica la misma amplitud de deformación se denominan  
 100 “escalones de deformación”. Las probetas ensayadas son cilindros de betún de 20 mm de  
 101 diámetro y 40 mm de altura, que se fabrican mediante el vertido del betún caliente en moldes de  
 102 latón. Durante el ensayo se registran aproximadamente 50 datos de fuerza y desplazamiento  
 103 para un ciclo completo cada 100 ciclos. Esto permite hallar la deformación y tensión promedio  
 104 que experimenta la probeta, la densidad de energía disipada (área del ciclo de histéresis  
 105 generado en el plano tensión-deformación) y el ángulo de fase. La tensión y deformación  
 106 medidas permiten hallar el módulo del módulo complejo. De cada ensayo se extraen dos  
 107 parámetros característicos:

- 108 • El módulo inicial: corresponde al promedio los 50 valores obtenidos durante el primer  
 109 escalón de deformación (760 microdeformaciones) para las normas de los módulos  
 110 complejos.
- 111 • Deformación de fallo: corresponde a la amplitud de deformación para la cual la  
 112 densidad de energía disipada disminuye por debajo del 50% del valor máximo  
 113 alcanzado durante el ensayo.

114



115

116

Figura 1. Configuración del ensayo EBADE para betunes y másticos.

117

118

119

El ensayo se puede realizar a temperaturas que oscilan entre 20°C y -5°C, aunque típicamente la temperatura de ensayo es de 10°C. De igual manera, la frecuencia de ensayo puede oscilar entre 0.1 Hz y 30 Hz, aunque normalmente se aplica a 10 Hz.

120

## 2.2 Adaptación del EBADE para medidas térmicas

121

122

123

124

125

126

127

Con el objetivo de cuantificar el efecto del calentamiento interno del betún durante ensayos cíclicos se propuso una ligera modificación del protocolo EBADE. La modificación consistió en alargar los escalones de deformación 2° y en adelante de 5.000 a 15.000, ya que existían indicios de que el tiempo requerido por el betún para alcanzar un estado estacionario de temperatura era inferior a 1.500 segundos, pero superior a 500. Debido a que la frecuencia de ensayo se estableció en 10 Hz, la duración de los escalones de deformación debía ser de 15.000 ciclos.

128

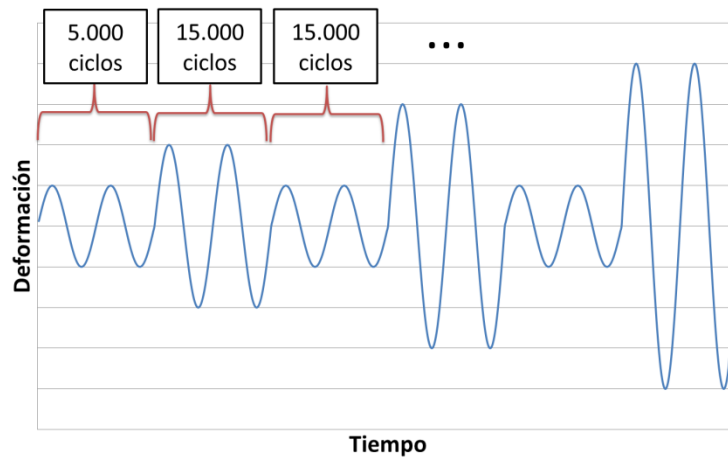
129

130

131

La segunda modificación que se introdujo en el protocolo EBADE fue la de intercalar un escalón de deformación a la mínima amplitud de deformación que permite el ensayo, 760 microdeformaciones, entre los sucesivos aumentos de deformación. De esta manera se permitía evaluar el módulo del material bajo las mismas condiciones después de cada escalón a

132 deformación elevada. Este retorno al escalón inicial es básico para poder evaluar la magnitud de  
133 los efectos reversibles que afectan tanto al módulo como a la disipación de energía, Figura 2.



134  
135 Figura 2. Ejemplo de la señal de deformación impuesta en la adaptación del EBADE.

### 136 2.3 Curva maestra

137 Los betunes son altamente sensibles a la temperatura y la frecuencia de ensayo. Para conocer  
138 cuál es la dependencia de las propiedades mecánicas de estos materiales con estas variables se  
139 suele emplear el concepto de “curva maestra”. Este concepto se basa en el principio de  
140 superposición tiempo-temperatura, que establece que es posible hallar una curva única que  
141 describa la variación de las propiedades mecánicas (típicamente módulo y ángulo de fase) con la  
142 temperatura y la frecuencia [13].

143 Para obtener la curva maestra del betún estudiado se empleó la configuración de carga del  
144 EBADE. Se aplicaron 10 ciclos a 0.1 Hz, 100 ciclos a 1 Hz y 1000 ciclos a 5, 10, 15, 20, 25 y  
145 30 Hz. La amplitud de deformación fue de 760 microdeformaciones y este tipo de ensayo se  
146 realizó a 3 temperaturas: 1.8, 10.5 y 19.7°C. La temperatura intermedia se tomó como  
147 temperatura de referencia para generar la curva maestra.

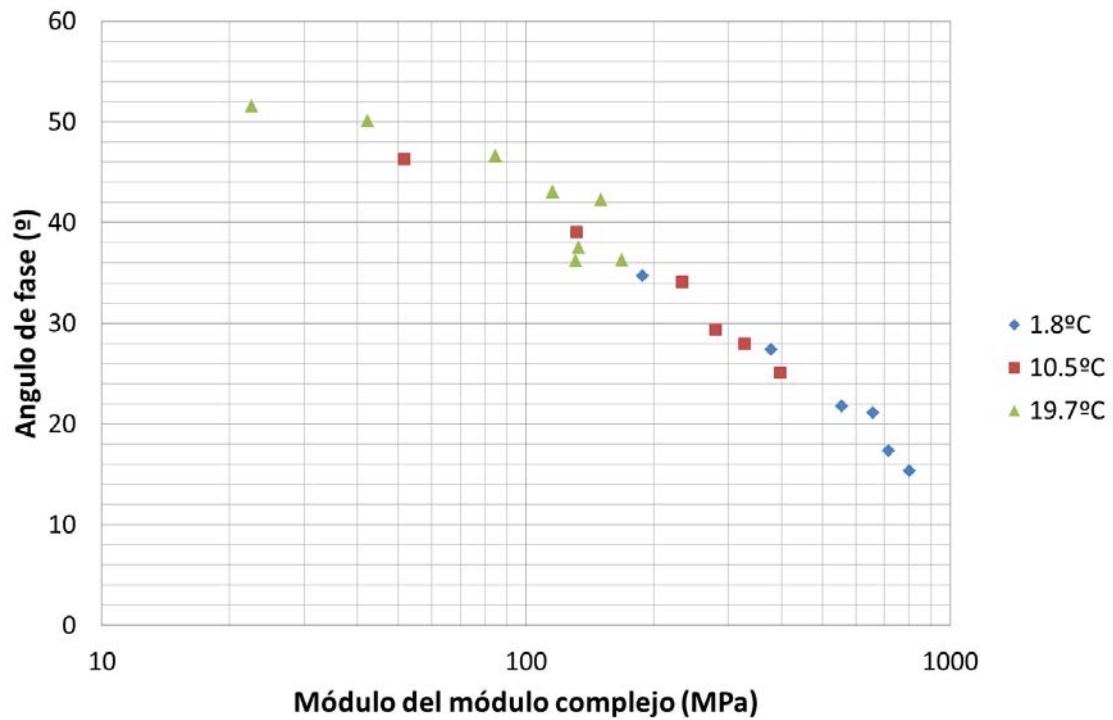
### 148 2.4 Materiales y plan de trabajo

149 Para llevar a cabo el estudio se escogió un betún convencional 35/50. Se fabricaron probetas  
150 cilíndricas de betún para llevar a cabo los ensayos necesarios para obtener la curva maestra del  
151 material, así como los EBADE adaptados para medir el aumento de la temperatura interna del  
152 material. Estos ensayos se llevaron a cabo a 1.5 y a 10.5°C. Para la fabricación de las probetas  
153 destinadas a estos ensayos se colocaron sondas termopares en el centro geométrico del molde,  
154 antes de verter el betún líquido. De esta manera se dispuso de una medida de la temperatura  
155 interna del material durante todo el ensayo.

## 156 3 Resultados

### 157 3.1 Curva maestra

158 La figura 3 muestra el Diagrama de Black para el betún 35/50. Para poder elaborar la curva  
159 maestra el Diagrama de Black debe presentar una curva sin discontinuidades [14]. Los datos  
160 presentados en la figura 3 describen una curva relativamente continua, con una pequeña  
161 desviación de algunos valores de la tendencia principal.

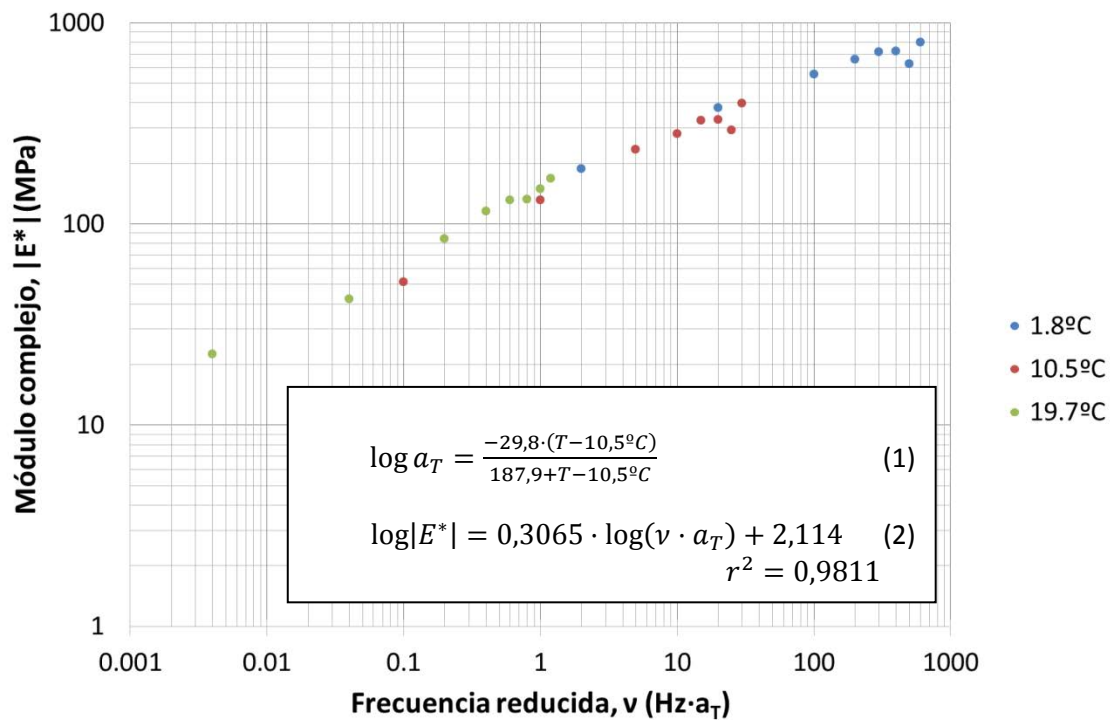


162

163

164

Figura 3. Diagrama de Black del betún 35/50.



165

166

167

168

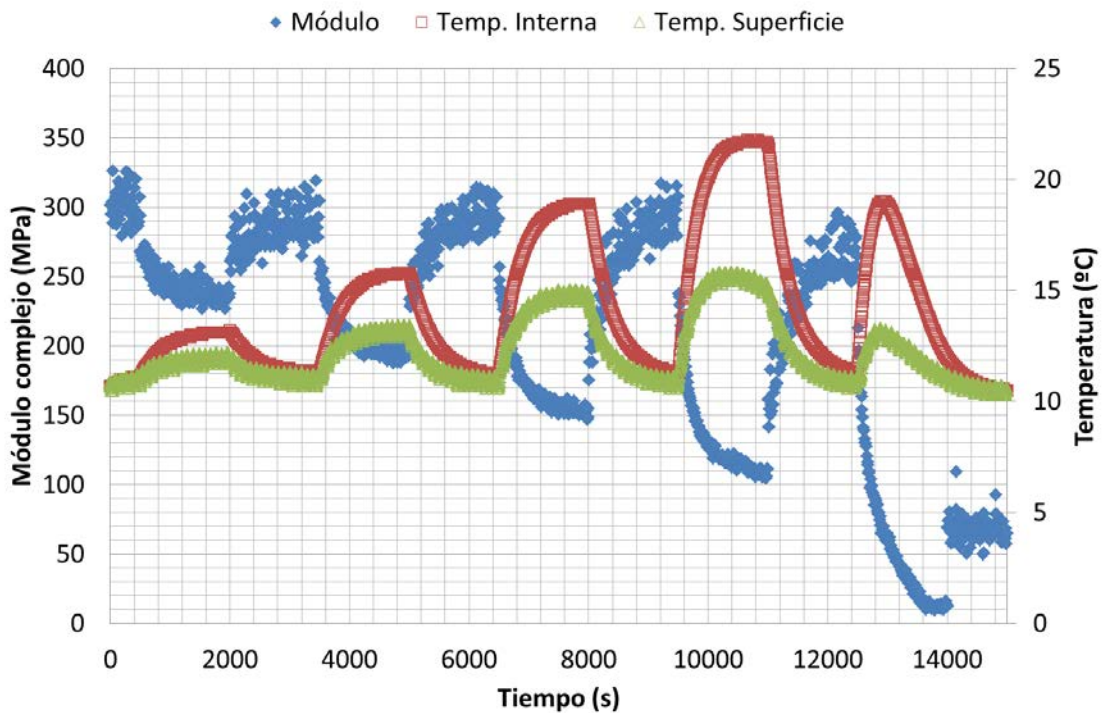
Figura 4. Curva maestra y coeficientes para el “shift factor” ( $a_T$ ) según el modelo Williams-Landel-Ferry [13].



169 La expresión para el “shift factor”, ecuación 1, junto con la interpolación obtenida, ecuación  
 170 2, sirvieron para predecir el módulo teórico que debería presentar el material a diferentes  
 171 temperaturas y frecuencias.

172 3.2 Medición de temperatura interna en ensayos cíclicos

173 A continuación se presentan los resultados obtenidos en los ensayos realizados para evaluar la  
 174 magnitud del aumento de temperatura interna en el betún 35/50.  
 175

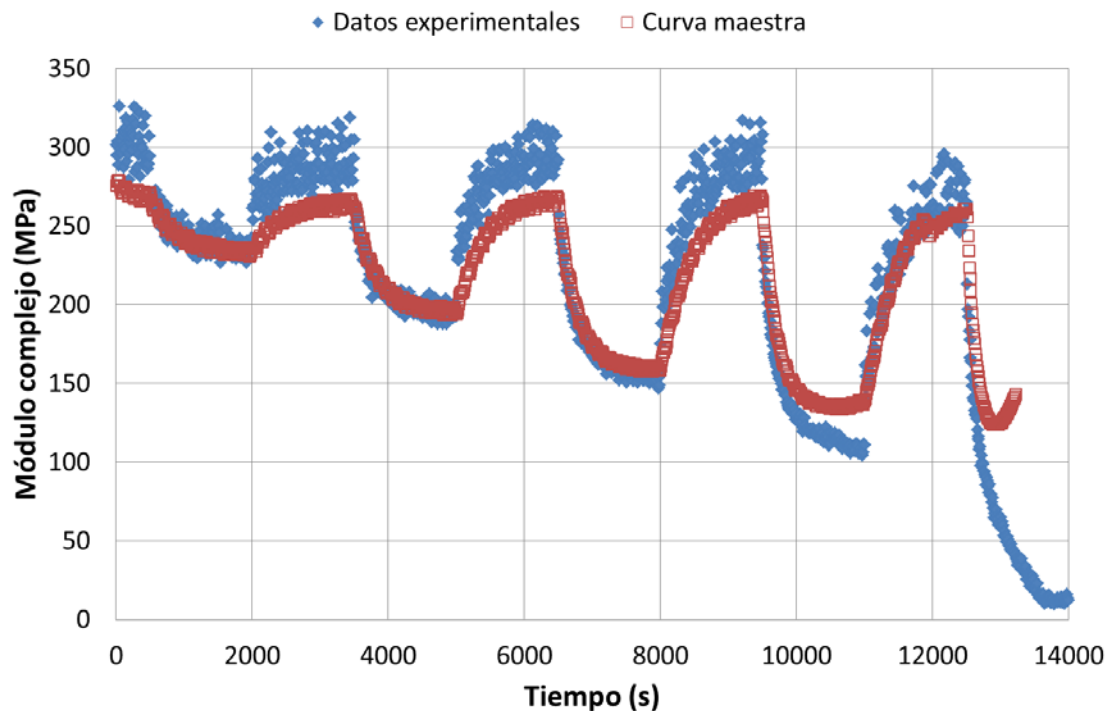


176

177 Figura 5. Evolución del módulo y la temperatura de la probeta durante el EBADE adaptado.

178 La figura 5 muestra como cada aumento de la deformación aplicada conlleva una  
 179 disminución del módulo, que se asemeja a un decaimiento exponencial, y un aumento de la  
 180 temperatura, que a su vez se asemeja a un crecimiento logarítmico. La reducción de la amplitud  
 181 de deformación provoca una inversión del comportamiento, i.e., incremento del módulo y  
 182 descenso de la temperatura. Las formas complementarias de ambas curvas indican que existen  
 183 una relación de causa y efecto entre ambos fenómenos. Cuanto mayor es la deformación  
 184 aplicada, mayor es la disminución del módulo y mayor el aumento de la temperatura. Esta  
 185 tendencia se mantiene hasta alcanzar el fallo total del material. Se observa como hasta el 4º  
 186 escalón de deformación (3.040 microdeformaciones) el betún recupera completamente su  
 187 módulo inicial si se aplica la deformación inicial (760 microdeformaciones) durante suficiente  
 188 tiempo. El retraso temporal en la recuperación y disminución del módulo es otro indicativo de  
 189 que la temperatura interna del material juega un papel importante en este fenómeno, ya que la  
 190 inercia térmica del material debe ser tomada en cuenta.

191 Promediando la temperatura medida en el centro geométrico de la probeta y la media de las  
 192 temperaturas medidas en la superficie (superior, medio e inferior) se puede hallar una  
 193 aproximación a la temperatura media de la probeta en todo momento. Combinando estos datos  
 194 con la curva maestra obtenida para el material, es posible estimar el módulo teórico que debería  
 195 presentar el betún en cada momento durante el ensayo. La figura 6 muestra la comparación entre  
 196 el módulo teórico medido mediante la temperatura y la curva maestra y el módulo experimental  
 197 medido mediante los datos carga y desplazamiento proporcionados por el equipo de ensayo.



198

199 Figura 6. Comparación entre los datos de módulo experimentales y el módulo teórico predicho  
200 por la curva maestra.

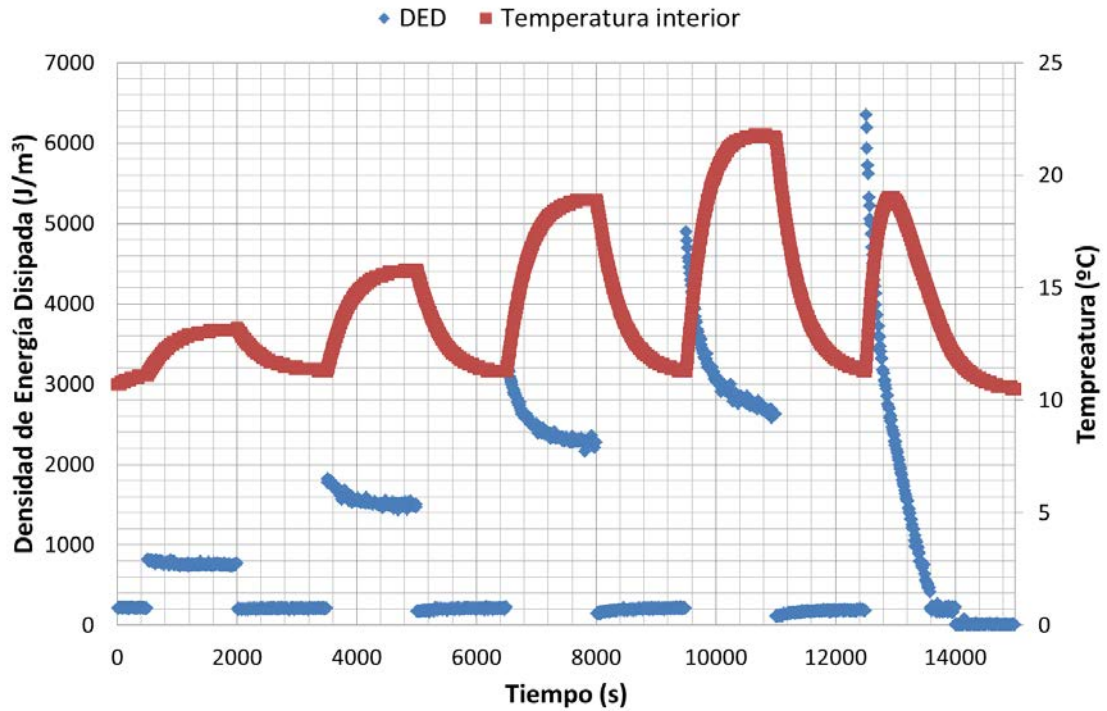
201 La figura 6 muestra como existe un ajuste muy bueno entre el módulo experimental medido  
202 durante el ensayo y el módulo teórico obtenido tan sólo mediante los datos de temperatura y la  
203 curva maestra del betún. Existen dos puntos en los que la predicción basada en la temperatura  
204 difiere de las mediciones experimentales.

205 Uno de ellos corresponde a la aplicación de los escalones de deformación más baja (760  
206 microdeformaciones), el material presenta un módulo aproximadamente un 10% superior; sin  
207 embargo a deformaciones altas la discrepancia es menor al 3% en todos los casos. Una posible  
208 explicación puede ser el cálculo de la temperatura media. Cuando existe una fuente de calor  
209 (aplicación de deformación relativamente alta), la temperatura promedio de la probeta se  
210 asemeja mucho al promedio entre la temperatura medida en el centro geométrico y la  
211 temperatura medida en la superficie. Al retirar la fuente de calor (deformación aplicada  
212 mínima), la temperatura media de la probeta depende más de la difusión del calor a través de  
213 ella procedente del exterior y por lo tanto el promedio empleado para el cálculo difiere de la  
214 temperatura media real. Otra explicación puede ser la presencia de efectos reversibles no  
215 relacionados con la temperatura, no-linealidad o tixotropía, por ejemplo.

216 Otro de los puntos de interés corresponde con el final del penúltimo escalón de deformación  
217 aplicado (entre 10,000 y 11,000 segundos). En este punto, a diferencia del resto, se observa una  
218 diferencia de un 18% en promedio entre el módulo medido y el estimado mediante la curva  
219 maestra. Sin embargo es para tiempos elevados y deformaciones altas para las que la esta  
220 diferencia es mínima en los escalones anteriores. Esto indica que existe algún cambio  
221 permanente en la estructura del material que no tiene que ver con la temperatura. En efecto, al  
222 disminuir la deformación aplicada, en este caso, el módulo no volvió a recuperar los valores  
223 obtenidos en los escalones de baja deformación previos.

224 También es importante analizar lo ocurrido a partir de los 13,000 segundos. La temperatura  
225 alcanzó un máximo 2.8°C por debajo del máximo en el escalón anterior, siendo la deformación  
226 de este último escalón 760 microdeformaciones superior, figura 5. Una vez alcanzado este  
227 máximo se produjo un descenso de la temperatura rápido, sin que se produjera un cambio en la  
228 amplitud de deformación. Por alguna razón, el material dejó de calentarse a partir de este punto.

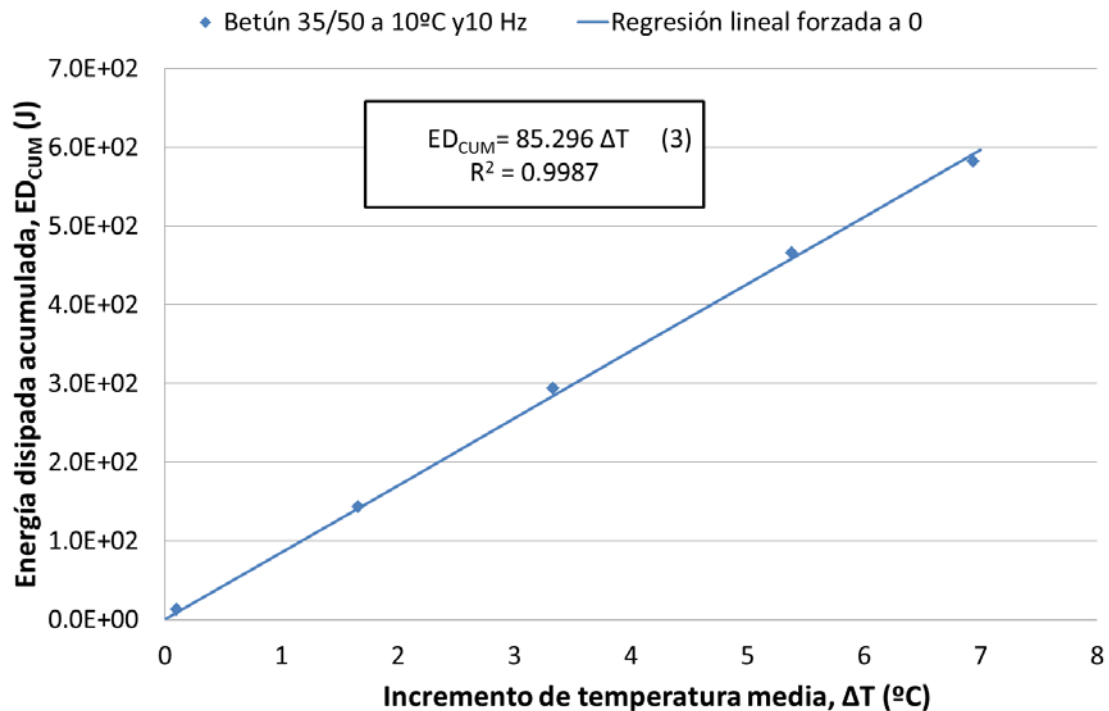
229 La explicación más plausible consiste en suponer que el momento en que la temperatura  
 230 interrumpe su aumento coincide con la aparición de microfisuras que contribuyen a reducir la  
 231 superficie de contacto, lo cual conlleva un descenso del módulo que no está relacionado con la  
 232 temperatura del material. Por lo tanto, la comparación entre el módulo predicho por la curva  
 233 maestra y el medido en el EBADE puede servir para determinar el momento exacto en el que se  
 234 produce el fallo de la probeta. Para entender este comportamiento es necesario analizar la  
 235 evolución de la DED, figura 7.  
 236



237  
 238 Figura 7. Evolución de la DED y la temperatura de la probeta durante el EBADE adaptado.

239 En la figura 7 se observa como los aumentos de amplitud de deformación van seguidos de un  
 240 aumento absoluto de la DED por ciclo, y de su disminución dentro de cada escalón de  
 241 deformación. La DED no es más que el área dentro del ciclo de histéresis que se forma en el  
 242 plano tensión-deformación, y representa la energía disipada por unidad de volumen en cada  
 243 ciclo. Por conservación de la energía, la DED debe destinarse a algún proceso que afecte al  
 244 material ensayado. El aumento de la temperatura es la explicación más lógica, a la vista de los  
 245 resultados. Por ello se trató de relacionar la acumulación de energía disipada en el total del  
 246 volumen de la probeta durante cada uno de los escalones de deformación elevada, con el  
 247 aumento relativo de la temperatura media en el mismo periodo, figura 8.  
 248





249

250

251

Figura 8. Relación lineal entre el aumento de temperatura media y la energía total disipada durante el mismo periodo de tiempo.

252

253

254

255

256

257

258

La Figura 8 muestra que existe una relación lineal casi perfecta entre la energía disipada por el material y el aumento de la temperatura. La regresión lineal fue forzada a intersectar el eje de las abscisas en 0, ya que, si la temperatura de la cámara climática se mantiene constante, no tiene sentido físico que exista incremento de temperatura si no existe energía disponible para generar tal aumento. El coeficiente de la recta combina información sobre la capacidad calorífica de la mezcla y la difusión de calor con el aire de la cámara.

259

260

261

262

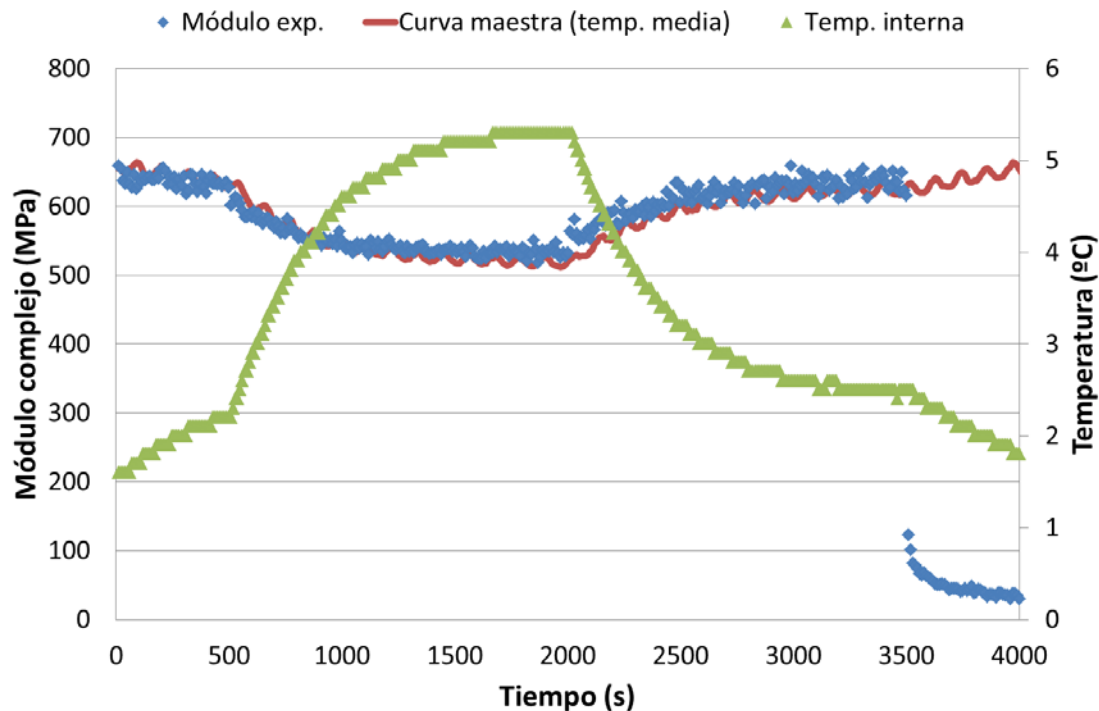
263

264

265

266

Los ensayos realizados a baja temperatura (1.5°C) también mostraron un aumento importante de la temperatura interna del betún, Figura 9. En este caso, el escalón de deformación mínima (760 microdeformaciones) produjo un aumento de la temperatura a diferencia de los ensayos realizados a 10.5°C. El ajuste de la predicción de módulo basada en la curva maestra, tomando la temperatura media, fue prácticamente exacto. Esto es debido a que la validez de la curva maestra se limita al rango visco-elástico lineal, y a baja temperatura el material se mantiene dentro de este rango hasta el fallo.



267

268 Figura 9. Evolución del módulo y la temperatura de la probeta durante el EBADE adaptado a  
 269 1.5°C y comparado con la predicción del módulo según la curva maestra y la temperatura  
 270 media.

271 **4 Conclusiones**

272 Este artículo presenta los resultados obtenidos en ensayos de barrido de formaciones destinados  
 273 a cuantificar la importancia del calentamiento interno de un betún convencional 35/50 durante  
 274 ensayos cíclicos.

275 Los resultados obtenidos mostraron que el calentamiento interno del betún puede explicar,  
 276 como mínimo, el 90% del descenso del módulo del ligante observado en ensayos cíclicos, tanto  
 277 a temperaturas intermedias (10.5°C) como a temperaturas bajas (1.5°C). La coincidencia entre  
 278 las medidas experimentales del módulo y las predichas por la curva maestra del material así lo  
 279 demuestran. Adicionalmente se demostró que la energía disipada por el material debida al  
 280 retraso que existe entre la carga aplicada y su respuesta, está directamente relacionada con el  
 281 aumento de temperatura del material. Es decir, la energía de disipación viscosa se convierte en  
 282 energía térmica.

283 La comparación entre el módulo experimental y el módulo predicho por la curva maestra  
 284 permitió establecer el momento exacto en que se produjo la aparición de micro o macrofisuras.  
 285 En otras palabras, la energía de disipación viscosa dejó de convertirse en energía térmica, para  
 286 convertirse en energía para crear nuevas superficies en el material.

287 Las implicaciones de este estudio van más allá de los betunes asfálticos. Estos son los que  
 288 otorgan la cohesión y flexibilidad a la mezcla bituminosa, y por lo tanto, es de esperar que el  
 289 calentamiento interno durante ensayos cíclicos también tenga lugar en estos materiales  
 290 compuestos. Si esto es así, los razonamientos empleados actualmente para caracterizar el  
 291 comportamiento a fatiga de estos materiales, basados en ensayos de barrido de tiempo y  
 292 criterios de fallo ligados a una reducción relativa del módulo, serían completamente erróneos.

293

294

295 **5 Agradecimientos**

296 El proyecto BIA2015-67494-P ha sido cofinanciado por el Ministerio de Economía y  
 297 Competitividad dentro del Programa Estatal de Fomento de la Investigación Científica y  
 298 Técnica de Excelencia, Subprograma Estatal de Generación de Conocimiento, convocatoria  
 299 2015, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-  
 300 2016, y por la Unión Europea, a través de fondos FEDER, con el objetivo principal de  
 301 Promover el desarrollo tecnológico, la innovación y una investigación de calidad.

302 **6 Referencias**

- 303 [1] Bonnetti, K.S., Nam, K., Bahia, H.U. Measuring and defining fatigue behavior of asphalt binders  
 304 (2002) *Transportation Research Record*, (1810), pp. 33-43.
- 305 [2] Shen, S., Airey, G.D., Carpenter, S.H., Huang, H. A dissipated energy approach to fatigue evaluation  
 306 (2006) *Road Materials and Pavement Design*, 7 (1), pp. 47-69.
- 307 [3] Isailović, I., Falchetto, A.C., Wistuba, M.P. Energy dissipation in asphalt mixtures observed in  
 308 different cyclic stress-controlled fatigue tests (2016) *RILEM Bookseries*, 11, pp. 693-703.
- 309 [4] Lakshmi Roja, K., Murali Krishnan, J. Use of dissipated energy to quantify fatigue life of Warm Mix  
 310 Asphalt (2017) *Functional Pavement Design - Proceedings of the 4th Chinese-European Workshop on*  
 311 *Functional Pavement Design, CEW 2016*, pp. 239-248.
- 312 [5] Ameri, M., Seif, M., Abbasi, M., Molayem, M., KhavandiKhiavi, A. Fatigue performance evaluation  
 313 of modified asphalt binder using of dissipated energy approach (2017) *Construction and Building*  
 314 *Materials*, 136, pp. 184-191.
- 315 [6] Di Benedetto, H., Soltani, A., Ashayer, Chaverot, P. Fatigue damage for bituminous mixtures: a  
 316 pertinent approach (1996) *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-*  
 317 *Proceedings of the Technical Sessions*, 65, pp. 142-158.
- 318 [7] Benedetto, H.D., Nguyen, Q.T., Sauzéat, C. Nonlinearity, heating, fatigue and thixotropy during  
 319 cyclic loading of asphalt mixtures (2011) *Road Materials and Pavement Design*, 12 (1), pp. 129-158.
- 320 [8] Pérez-Jiménez, F.E., Botella, R., Miró, R. Differentiating between damage and thixotropy in asphalt  
 321 binder's fatigue tests (2012) *Construction and Building Materials*, 31, pp. 212-219.
- 322 [9] Pérez-Jiménez, F.E., Botella, R., Miró, R., Martínez, A.H. Analysis of the thixotropic behavior and  
 323 the deterioration process of bitumen in fatigue tests (2015) *Construction and Building Materials*, 101, pp.  
 324 277-286.
- 325 [10] Mangiafico, S., Sauzéat, C., Di Benedetto, H., Pouget, S., Olard, F., Planque, L. Quantification of  
 326 biasing effects during fatigue tests on asphalt mixes: Non-linearity, self-heating and thixotropy (2015)  
 327 *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical*  
 328 *Sessions*, 84, pp. 143-180.
- 329 [11] Riahi, E., Allou, F., Botella, R., Fakhari Tehrani, F., Dubois, F., Absi, J., Petit, C., Pérez-Jiménez,  
 330 F.E. Modelling self-heating and thixotropy phenomena under the cyclic loading of asphalt  
 331 (2017) *Road Materials and Pavement Design*, 18, 2, pp. 155-163.
- 332 [12] Botella, R., Pérez-Jiménez, F.E., Miró, R. Application of a strain sweep test to assess fatigue  
 333 behavior of asphalt binders (2012) *Construction and Building Materials*, 36, pp. 906-912.
- 334 [13] Williams, M.L., Landel, R.F., Ferry, J.D. The temperature dependence of relaxation mechanisms in  
 335 amorphous polymers and other glass-forming liquids (1955) *Journal of the American Chemical Society*,  
 336 77 (14), pp. 3701-3707.
- 337 [14] Chailleux, E., Ramond, G., Such, C., De La Roche, C. A mathematical-based master-curve  
 338 construction method applied to complex modulus of bituminous materials (2006) *Road Materials and*  
 339 *Pavement Design*, 7, pp. 75-92.