



CONTROL DE CALIDAD DEL COMPORTAMIENTO A FISURACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON TASAS MEDIAS DE ASFALTO RECUPERADO

Javier Loma¹, José Luis Peña², María Sánchez³, Roberto Orozco⁴, Rafael Jiménez³, David Llopis⁵, Isaías García⁶, Pedro Francisco Hernández⁷, Aida Marzá⁸, Marisa Carmona⁹, Lucía Miranda¹⁰, Carlos Peña¹¹, Marisol Barral¹², Esther Tomás¹³.

¹ Padecasa, Madrid, España, javierloma@padecasa.com

² Asefma, Madrid, España, jlpena@asefma.com.es

³ Cedex, Madrid, España, maria.sanchez@cedex.es rjimenez@cedex.es

⁴ Tecnofirmes, Madrid, España, rorozco@tecnofirmes.es

⁵ Universitat Politècnica de València, Valencia, España, dallocas@upv.es

⁶ Laboratorio de la Región de Murcia, Murcia, España, isaías.garcía@carm.es

⁷ Ministerio de Transporte y Movilidad Sostenible, Murcia, España, pfhernandez@transportes.gob.es

⁸ Becsa, Castellón, España, amarza@becsa.es

⁹ Intromac, Cáceres, España, marisa.carmona@org.juntaex.es

¹⁰ Repsol, Madrid, España, marialucia.miranda@repsol.com

¹¹ Asfaltos Vicálvaro, Madrid, España, carlospena@asfaltosvicalvaro.com

¹² Campezo, San Sebastián, España, mbarral@campezo.com

¹³ CIESM-Intevia, Madrid, España, esther.tomas@ciesm-intevia.es

Resumen

La reutilización del asfalto recuperado (RA) de las obras de rehabilitación de los pavimentos asfálticos exige aumentar las tasas de uso de este material en las mezclas asfálticas.

Desde hace décadas, en España se han realizado obras singulares con tasas entre el 30 y el 90% de RA y dado que se trataba de obras con un especial seguimiento, los diseños de las mezclas y el control de calidad han sido estrictos, lo que ha permitido obtener buenos resultados.

En estos momentos, el reto se centra en la reutilización de asfalto recuperado en tasas entre el 20 y el 40% de forma habitual y disponer de medios de control de calidad sencillos y operativos durante el proceso de fabricación que permitan garantizar las prestaciones de las mezclas, especialmente en lo relativo a la resistencia a la fisuración.

El grupo Aleas “reutilización de mezclas bituminosas” ha explorado el uso del método de ensayo SCB como alternativa al método de ensayo NLT-383/20 “Evaluación de la resistencia, tenacidad y energía de rotura de las mezclas bituminosas mediante el ensayo FENIX”.

Junto al ensayo SCB, se han realizado caracterizaciones mediante ensayos de fatiga, medida de la rigidez y medida del grado de interacción de los ligantes mediante FTIR. Aunque no es probable que estas metodologías de ensayo se puedan usar de forma rutinaria en el control de calidad, para interpretar los efectos observados se ha buscado el respaldo con ensayos más fundamentales.

Los resultados obtenidos muestran que el ensayo SCB no presenta la sensibilidad necesaria para diferenciar de forma efectiva el impacto del uso de asfalto recuperado en mezclas bituminosas tipo AC en tasas del 20%.

La información obtenida ha permitido abrir nuevas líneas de trabajo cuyos primeros resultados se recogen también en esta publicación.

Palabras Clave:

asfalto recuperado, fisuración, mezclas bituminosas, reutilización

1. Introducción

La incorporación de asfalto recuperado (RA) en las mezclas bituminosas en tasas medias (entre el 20 y el 30%) es el objetivo del sector de la pavimentación asfáltica. Los elementos tructores de esta necesidad son la mejora de los impactos medioambientales de las mezclas asfálticas, especialmente la huella de carbono, así como la normativa sobre implantación de criterios de economía circular en todos los procesos productivos.

Aunque la reutilización de asfalto recuperado en España tiene más de tres décadas de experiencia, utilizando todo tipo de tecnologías (reciclado en caliente en tasas medias y altas, reciclado en frío in situ, reciclado a bajas tasas), el número de contratistas que han ejecutado dichas obras ha sido relativamente reducido y en las mismas se han establecido procesos de control de calidad muy rigurosos dado que se trata de tecnologías poco corrientes.

Hoy en día, el uso de RA se ha popularizado y, aunque la tasa media de reutilización calculada respecto a la producción total de mezclas bituminosas es inferior al 10%, esta tasa se está incrementando de forma sostenida. A este desarrollo colabora la gran inversión que los fabricantes de mezclas están realizando para modernizar las plantas asfálticas.

Los procedimientos para incorporar el RA son muy variados. En primer lugar, hay que destacar que la práctica totalidad de las plantas asfálticas en España son del tipo discontinuo. De esta manera, la incorporación del RA se realiza: en frío en el mezclador, al final del tambor secador, mediante tambores especiales tipo R, mediante el uso de dobles tambores o por combinación de algunos de los procedimientos antes enumerados.

La calidad de las mezclas obtenidas por los diversos métodos no es homogénea y depende mucho de la capacitación técnica de los operadores de las plantas. Esto hace que el control de calidad de las mezclas se deba reforzar respecto a las mezclas bituminosas sin RA, pero esta necesidad choca con la falta de medios técnicos que permitan un control de calidad efectivo durante el proceso de fabricación.

Sí se dispone de ensayos y equipos para el control en la fase de estudio, pero estos métodos son complejos y difícilmente aplicables en el control diario de producción.

Esta popularización del uso del RA genera nuevas necesidades a la hora de controlar la calidad de las mezclas bituminosas. Bajo este entorno, el grupo Aleas abordó el desarrollo de métodos de control de calidad eficientes para su uso en el control diario de las mezclas.

La incorporación de RA en las mezclas contribuye a su rigidización. Esto tiene un efecto positivo sobre la resistencia a las deformaciones plásticas y uno negativo sobre la resistencia a la fisuración.

Para evaluar la resistencia a la fisuración, en España se utiliza el ensayo de resistencia a la fatiga (UNE EN 12697-24 método 4PB) y más recientemente el ensayo Fénix (NLT-383/20). También existen experiencias en el uso del ensayo UGR-FACT (UNE 41210:2022). Si bien el

ensayo Fénix es el más sencillo de operar, aún sigue siendo un ensayo que exige personal y medios físicos que no siempre se encuentran en las obras. Por esta razón, se buscó el uso de otros métodos de ensayo más simples de realizar.

De las diversas opciones disponibles, se optó por el ensayo SCB (UNE EN 12697-44:2019) “Propagación de fisura por el ensayo de flexión con una probeta semicircular”. Sin embargo, el uso de este ensayo exigía disponer de probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro que no son muy comunes en España. Además, de acuerdo con la experiencia recabada de algunos laboratorios, el tamaño de la entalla generaba ciertos problemas prácticos para generarla y la velocidad de desplazamiento de la norma (5 mm/min) hace que la rotura de las probetas fuese demasiado frágil, especialmente al emplear bajas temperatura de ensayo.

Ya se ha citado que existen diversas formas de añadir el asfalto recuperado durante el proceso de fabricación. Para tasas intermedias, uno de los más populares es el uso de un sistema de adición gravimétrico al mezclador, lo que exige sobrecalentar los áridos vírgenes para compensar la pérdida de temperatura generada al ponerlos en contacto con el asfalto recuperado a temperatura ambiente y que tiene cierto grado de humedad.

Al tratarse de plantas discontinuas, el tiempo de mezclado es un parámetro importante y éste debe ser incrementado respecto al utilizado en mezclas que no contengan RA. García-Santiago [1] observó de forma visual cómo el tiempo de mezclado genera cambios sustanciales en el color de las mezclas cuando el asfalto recuperado se añade a temperatura ambiente al mezclador junto con los áridos sobrecalentados (ver Figura 1).



Figura 1. Evolución de las mezclas con RA en función del tiempo de mezclado. Fuente [1].

Por lo tanto, en el proceso de adición de RA, tan importante como la cantidad y calidad del RA puede ser el proceso de fabricación.

Por esta razón, el grupo Aleas identificó la necesidad de encontrar métodos de control de calidad sencillos y con sensibilidad suficiente que fuesen capaces de clasificar la calidad de las mezclas bituminosas en función de su resistencia a la fisuración.

En España existe una amplia experiencia en el uso del ensayo Fénix para caracterizar la resistencia a la fisuración de las mezclas, pero su operatividad, aun siendo muy superior a la de los ensayos de fatiga, aún tiene importantes limitaciones en el control de calidad rutinario de las plantas asfálticas y de las obras.

Por esta razón, se diseñó un plan de trabajo que permitiese comparar mezclas con y sin RA, con diversos tiempos de mezclado mediante el ensayo Fénix (NLT-383), el ensayo SCB (UNE EN 12697-44) y completando el estudio con ensayos de fatiga (UNE EN 12697-24) y módulo de rigidez (UNE EN 12697-26). Adicionalmente se ha realizado un estudio sobre el proceso de mezclado del ligante envejecido y el betún de aportación mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

2. Procedimiento experimental

El trabajo desarrollado se ha centrado en la evaluación de tres mezclas bituminosas del tipo AC16 D fabricadas con betún 50/70 en las que dos de ellas contenían un 20% de asfalto recuperado. Las tres mezclas fueron fabricadas en una planta industrial discontinua equipada con un sistema de adición de RA en el mezclador a temperatura ambiente.

Una de las mezclas con RA se fabricó con un tiempo de mezclado estándar (AC16 D + R20), mientras que en la segunda se incrementó un 200% el tiempo de mezclado (AC16 D + R20+). La mezcla de referencia también se fabricó con betún 50/70. En las tres mezclas, el contenido total de betún (aportación y envejecido) fue del 4,9% sobre mezcla. En la Tabla 1 se muestra la granulometría de la mezcla AC16 B50/70 sin RA (AC16 D).

Tabla 1. Granulometría de la mezcla AC16 D.

Tamíz (mm)	22,5	16	8	4	2	0,5	0,25	0,063
% pasa	100	95	76	54	36	17	12	6

Igualmente se caracterizó el asfalto recuperado (RA) cuyas principales características se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización del asfalto recuperado.

Contenido de ligante (% s/m)	4,5
Penetración del ligante (dmm)	7
Punto de reblandecimiento (°C)	84

En total, 10 laboratorios han participado en la realización del programa experimental. Los ensayos llevados a cabo fueron los siguientes:

- Granulometría de la mezcla sin RA y del asfalto recuperado.
- Densidad máxima y aparente de las mezclas.
- Ensayo Fénix (NLT-383)
- Ensayo SCB (según protocolo propio del grupo Aleas)
- Módulo dinámico (UNE EN 12697-26, anexo C)
- Resistencia a la fatiga en 4 puntos (UNE EN 12697-24, anexo D)
- Espectroscopia infrarroja (FTIR)

2.1 Espectroscopía infrarroja

Una de las cuestiones que se quería verificar experimentalmente es si el tiempo de mezclado tiene un efecto positivo en el proceso de mezclado del betún residual procedente del RA con el betún de aportación.

Para analizar el proceso de mezclado, se ha utilizado la técnica de espectroscopia FTIR mediante el procedimiento ATR. El betún analizado procede del RA y de las tres mezclas objeto del estudio.

Es común que en los estudios de análisis de mezclas bituminosas con RA se caracterice el ligante extraído mediante el uso de disolventes. Esta técnica enmascara los resultados ya que el propio disolvente genera un proceso de mezclado total del ligante del RA y el de aportación. Para evitar esta limitación, en este estudio el betún analizado se ha obtenido a partir de las partículas gruesas de árido virgen. Una vez producida la mezcla en la planta asfáltica, se separan a mano los áridos vírgenes más gruesos que están recubiertos de betún. Este betún es la mezcla de betún envejecido y ligante de aportación por lo que su nivel de mezclado no ha sido modificado por el uso de disolventes.

La ventaja de la técnica FTIR es que necesita cantidades mínimas de ligante por lo que la película de ligante que queda depositada en los áridos gruesos es suficiente. En la Figura 2 se muestran los espectros de las tres mezclas y la del RA.

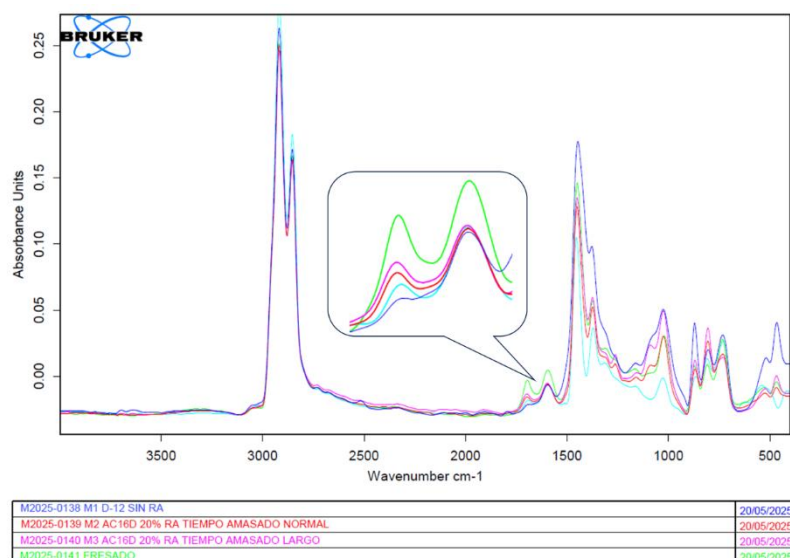


Figura 2. Espectros FTIR de las mezclas bituminosas estudiadas.

El análisis se ha centrado en la banda correspondiente al grupo carbonilo (1696 cm^{-1}) que es una señal característica del grado de oxidación del betún. Ha de señalarse que el método ATR no permite un análisis cuantitativo, por lo que el área del pico de dicha banda tan solo sirve como referencia cualitativa. Es evidente que el betún del RA tiene una banda mucho mayor que el resto de muestras, pero no puede usarse directamente para cuantificar la cantidad de betún envejecido en las mezclas con RA.

En cualquier caso, los espectros muestran de forma clara que hay un proceso de mezclado del betún envejecido del RA con el betún de aportación (B50/70). Parece que el mayor tiempo de mezclado también favorece el proceso de mezclado de los ligantes, aunque las pequeñas diferencias y, dado que el ensayo realizado no es cuantitativo, no permiten concluir de forma clara que esta técnica se pueda utilizar para evaluar la calidad del mezclado en planta.

2.2 Ensayos Fénix y SCB

La caracterización de la resistencia a la fisuración, además del ensayo de fatiga, se ha realizado en paralelo con el ensayo Fénix (NLT-383) y con una variante del ensayo SCB, utilizando probetas de 100 mm de diámetro y fabricadas con un compactador de impacto. El procedimiento experimental utilizado en el ensayo SCB y para acondicionar las mezclas se describen en [2] y [3], respectivamente. Es de destacar, que además del cambio del tamaño de las probetas, la principal modificación ha sido la velocidad de desplazamiento, usándose la misma que en el ensayo Fénix.

Ambos ensayos se han realizado a 20°C y 5°C . No obstante, con el ensayo SCB a 5°C las roturas fueron tan bruscas que impidieron medir algunos de los parámetros tras la carga máxima.

En las Tablas 3 y 4 se recogen los datos obtenidos en el ensayo Fénix con las tres muestras. Los datos corresponden al promedio de 6 laboratorios que ensayaron 4 probetas por tipo de mezcla y temperatura.

Tabla 3. Ensayo Fénix (NLT-383) a 20°C .

	unidad	AC16 original	AC16+R20	AC16+R20+	SD promedio
Fmax	kN	0,87	1,01	1,11	0,19
DT	mm	0,71	0,71	0,65	0,21
RT	MPa	0,42	0,37	0,41	0,16

IRT	MPa/mm	1,34	1,91	1,74	0,71
G _D	J/m ²	378	459	485	79
T	J/m ²	302	371	385	65
IT	mN	215	260	257	102
RTxDT	kN/mm	0,30	0,25	0,25	0,12

Tabla 4. Ensayo Fénix (NLT-383) a 5°C.

unidad		AC16 original	AC16+R20	AC16+R20+	SD promedio
Fmax	kN	2,47	2,73	2,96	0,19
DT	mm	0,12	0,11	0,08	0,04
RT	MPa	0,90	0,98	1,07	0,07
IRT	MPa/mm	5,33	3,71	5,23	1,81
G _D	J/m ²	371	435	404	69
T	J/m ²	255	275	260	71
IT	mN	30	34	20	16
RTxDT	kN/mm	0,10	0,11	0,08	0,04

Para cada uno de los parámetros medidos se ha calculado una desviación estándar como promedio de las desviaciones estándar obtenidas por cada laboratorio participante.

En el caso del ensayo SCB, para calcular los parámetros asociados a la tenacidad a la fractura se han utilizado dos métodos de cálculo, el indicado en la norma UNE EN 12697-44 y el de la norma AASHTO TP105. Los valores obtenidos se muestran en las Tablas 5 y 6. Los datos fueron obtenidos por 4 laboratorios que ensayaron 4 probetas por tipo de mezcla y temperatura. Con la metodología AASHTO TP105 solo dos laboratorios pudieron obtener datos.

Tabla 5. Ensayo SCB a 20°C.

UNE EN 12697-44	unidad	AC16 original	AC16+R20	AC16+R20+	SD Promedio
Deformación en la carga máxima	mm	1,62	1,79	1,54	0,13
Tensión de rotura (s _{max})	N/mm ²	0,50	0,58	0,58	0,08
Resistencia de rotura (tenacidad a la fractura) (K _I)	N/mm ^{1,5}	10,56	12,83	12,50	1,60

Metodología AASHTO TP105

Energía de fractura G _f	J/m ²	1002	1056	1074	201
Tenacidad a la fractura	N/mm ^{1,5}	11,4	12,9	13,6	2,03

Tabla 6. Ensayo SCB a 5°C.

UNE EN 12697-44	unidad	AC16 original	AC16+R20	AC16+R20+	SD Promedio
Deformación en la carga máxima	mm	1,30	2,01	1,19	0,54
Tensión de rotura (s _{max})	N/mm ²	1,03	1,04	1,13	0,28

Resistencia de rotura (tenacidad a la fractura) (K_I)	N/mm ^{1,5}	21,16	21,98	24,14	3,49
---	---------------------	-------	-------	-------	------

Metodología AASHTO TP105

Energía de fractura G_f	J/m ²	1034	948	965	
Tenacidad a la fractura	N/mm ^{1,5}	24,33	26,77	30,79	6,49

Uno de los laboratorios participantes llevó a cabo el ensayo SCB utilizando probetas de 100 mm y de 150 mm, estas últimas compactadas mediante el compactador giratorio. No se observaron diferencias significativas en los parámetros estudiados.

Los ensayos UNE EN 12697-44 y el AASHTO TP105 también se diferencian en el uso de pletinas de apoyo en la zona que el bastidor de ensayo se apoya. Algunos de los laboratorios han realizados ensayos por duplicado con y sin pletina, resultando que las probetas sin pletina generan más dispersión en los resultados.

2.3 Módulo dinámico y resistencia a la fatiga

Paralelamente a los ensayos Fénix y SCB, se realizaron ensayos de caracterización de la rigidez de las mezclas (UNE EN 12697-26, anexo C) y de su resistencia a la fatiga mediante el ensayo de flexión en 4 puntos (UNE EN 12697-24, anexo D). Estos ensayos sólo fueron realizados por dos de los laboratorios que intervinieron en el estudio.

En la Figura 3 se recogen los datos de módulos dinámicos a 20°C y 5°C de uno de los laboratorios. El otro laboratorio, tan solo realizó medidas de la mezcla AC16 D y de la mezcla con un 20% de RA y un tiempo de mezclado estándar. La mezcla AC16 D dio resultados similares al laboratorio 1 pero la mezcla con RA tenía un módulo superior (un 17% superior).

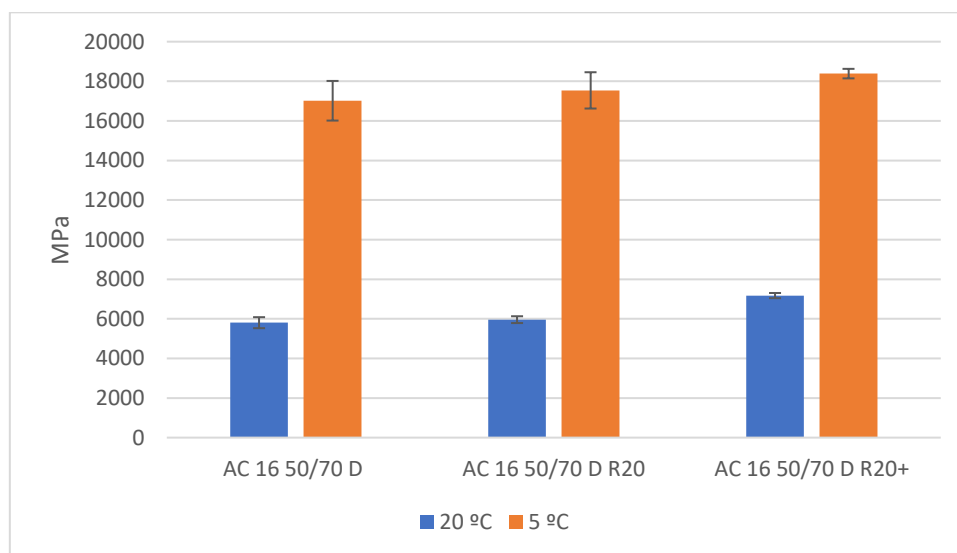


Figura 3. Módulo dinámico de las mezclas.

Los resultados obtenidos en el ensayo de fatiga por flexión en cuatro puntos se muestran en la Tabla 7. Para este ensayo se analizó la muestra de referencia AC16 D y la muestra con un 20% de RA y un tiempo de mezclado estándar.

Los ensayos han sido realizados en el modo de control de la deformación.

Tabla 7. Resultados del parámetro ϵ_6 .

	ϵ_6	
	Laboratorio 1	Laboratorio 2
AC16 D	97	136
AC16+R20	96	120

3. Análisis de los resultados y conclusiones

El objetivo principal del trabajo era encontrar un procedimiento de ensayo para evaluar la resistencia a la fisuración de las mezclas que fuese menos complejo a nivel operativo que el ensayo Fénix (NLT-383).

La evaluación de las tres mezclas con ambos métodos no permitiría hacer una clasificación en función de su resistencia a la fisuración ya que la variabilidad de ambos ensayos anula las diferencias numéricas existentes.

En el caso del ensayo Fénix, la nota técnica [4] recomienda que el valor del parámetro DT a 5°C sea superior a 0,25 mm, supuesto que este estudio sea considerado como una fórmula de trabajo, y en las tres mezclas ensayadas es inferior a dicho valor con una desviación estándar de los resultados que tampoco permite aventurar que el valor medio oculte valores muy extremos.

Tampoco el parámetro RTxDT cumpliría con la recomendación de la nota técnica ($\geq 0,20$ kN/mm).

Una posible explicación de este incumplimiento se puede deber a que todas las muestras tuvieron que ser recalentadas para compactar las probetas y que las muestras proceden de una planta industrial, lo que puede haber incrementado la oxidación respecto a los valores que se pueden obtener en los estudios de laboratorio para determinar la fórmula de trabajo. En el estudio interlaboratorios [5] se mostró que el recalentamiento afectaba muy negativamente a los parámetros DT y RTxDT, pasando de ser aceptables en mezclas sin recalentar a quedar muy lejos del valor mínimo una vez recalentadas. En la Tabla 8 se muestran parte de los resultados de dicho ensayo interlaboratorios.

Tabla 8. Efecto del recalentamiento de las muestras en los resultados del ensayo interlaboratorios del ensayo Fénix [5].

unidad		AC16 50/70 D acondicionada	AC16 50/70 D R20 acondicionada	AC16 50/70 D recalentada	AC16 50/70 D R20 recalentada
DT	mm	0,24	0,15	0,11	0,09
RT	MPa	1,12	1,00	1,15	1,15
RTxDT	kN/mm	0,27	0,15	0,13	0,11

Tanto con el ensayo Fénix como con el ensayo SCB la reproducibilidad de los ensayos oculta las potenciales diferencias en la resistencia a la fisuración de las mezclas. Este enmascaramiento de las diferencias entre mezclas es más acusado en este caso debido a que los principales parámetros analizados disminuyen en valor absoluto, pero la desviación estándar no lo hace tanto.

Sin embargo, el análisis FTIR confirma que sí existe un proceso de mezclado efectivo del ligante envejecido del RA con el nuevo ligante de aportación. El incremento en el tiempo de mezclado favorece el proceso de mezclado, aunque las diferencias no han podido ser cuantificadas dado que el método ATR del FTIR no permite un análisis cuantitativo.

Aunque se han encontrado diferencias significativas entre los laboratorios en la caracterización de la rigidez, parece que la incorporación de un 20% de RA incrementa el módulo de la mezcla alrededor de un 20%. Sin embargo, al analizar más en detalle la evolución de los módulos en el ensayo de fatiga, en la zona de la etapa 2 y para bajos niveles de deformación, no se observan diferencias significativas de los módulos entre mezclas con y sin RA (Figura 4), aunque sí hay diferencias en la fase inicial del ensayo, con diferencias similares a las encontradas al caracterizar el módulo dinámico.

También es posible que las diferencias entre las mezclas con y sin RA se vean reducidas debido al recalentamiento de las mezclas. Es muy probable que la mezcla sin RA sufra, proporcionalmente, un envejecimiento del ligante superior al de las mezclas sin RA.

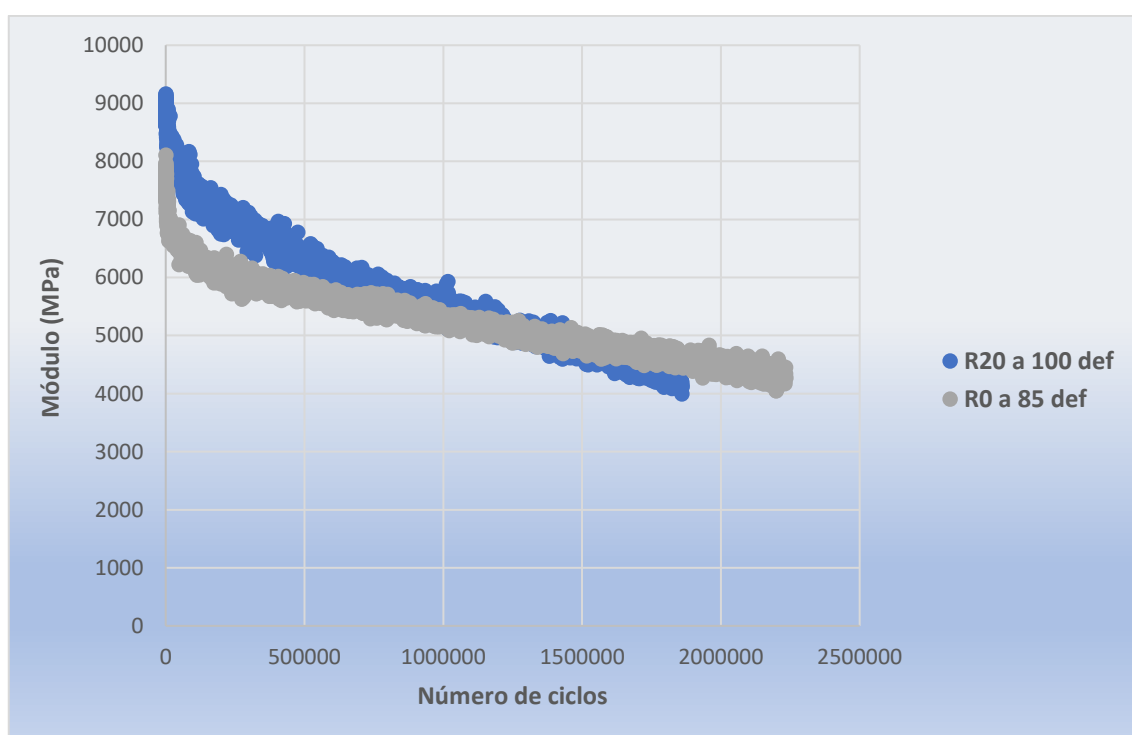


Figura 4. Evolución del módulo en el ensayo de fatiga a bajos niveles de deformación.

Como resumen, puede concluirse que el ensayo SCB aplicado sobre probetas de 100 mm, no parece ser una alternativa para evaluar la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas con una tasa media de asfalto recuperado.

El ensayo Fénix parece ofrecer algo más de información sobre las muestras recalentadas, pero la reproducibilidad del ensayo y el efecto del recalentamiento de las muestras limita mucho la clasificación de la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas.

Este estudio, parece confirmar confirmando los resultados de estudios anteriores del grupo Aleas, poniendo de manifiesto que el control de calidad en la fase de producción se debe realizar preferentemente sobre probetas no recalentadas, en las cuales se altera mucho menos el comportamiento del ligante, y facilita cuantificar las potenciales diferencias existentes.

3. Referencias

- [1] García-Santiago J.L. (2018). Reciclar, reciclar y volver a reciclar: economía circular sin fin de los firmes asfálticos, pero ¿sabemos cuál es el ligante que, realmente, gobierna el comportamiento de la mezcla?, ¿en qué proporción? Simposio Nacional de Firmes. Madrid
- [2] Procedimiento experimental. Acondicionamiento de muestras de mezclas bituminosas para la preparación de probetas. PEAleas-1.Revisión 03. Mayo 2023.
- [3] Procedimiento experimental. Propagación de la fisuración mediante un ensayo a flexión de una probeta semicircular UNE EN 12697-44. PEAleas-3-Revisión 01. Abril 2023
- [4] NOTA TÉCNICA NT 01/2022 Sobre la utilización del Ensayo Fénix en el control de calidad de las obras de firmes con mezclas bituminosas.
- [5] Sánchez M.N et al.(2024). Ensayo interlaboratorios sobre el ensayo Fénix. Memoria Técnica del XXII CILA. Granada. Comunicación libre nº 104.