

ANÁLISIS DE RECICLABILIDAD Y RESISTENCIA AL DESGASTE EN MEZCLAS BITUMINOSAS

Darío Prieto Quintana¹, Irune Indacoechea Vega², Sebastián L. A. Lara Barriá³, Manuel E. Lagos Varas⁴
y Daniel Castro Fresno⁵

¹ GITECO, Universidad de Cantabria, Santander, España, dario.prieto@unican.es

² GITECO, Universidad de Cantabria, Santander, España, irune.indacoechea@unican.es

³ GITECO, Universidad de Cantabria, Santander, España, sebastian.larabarria@unican.es

⁴ GITECO, Universidad de Cantabria, Santander, España, manuel.lagos@unican.es

⁵ GITECO, Universidad de Cantabria, Santander, España, daniel.castro@unican.es

Resumen

El presente estudio revisa el comportamiento mecánico de las mezclas bioasfálticas fabricadas con un bioligante, el cual es una combinación de un asfalto duro y de un aceite rejuvenecedor, así como la incorporación de material fresado. El objetivo principal consiste en estudiar la viabilidad de estas combinaciones como alternativas sostenibles con el propósito de reducir el consumo de materias primas vírgenes y de la huella de carbono en el sector.

Se diseñaron para ello diferentes combinaciones experimentales con material virgen o con un 30% de reemplazo por material fresado. Las propiedades mecánicas se evaluaron mediante el ensayo de huecos, sensibilidad al agua y resistencia a las deformaciones plásticas. Las mezclas, además, se ensayaron en un simulador de desgaste acelerado para analizar su comportamiento frente a cargas cíclicas y se estudió la progresión de la deformación acumulada.

Los resultados obtenidos indican que las mezclas presentan buenos resultados mecánicos. Utilizando el bioligante, éstos son superiores a la mezcla de referencia. La incorporación del material fresado provocó que fueran mezclas más rígidas debido al envejecimiento del ligante, aunque el uso del bioligante compensó parcialmente este efecto. Los ensayos realizados en el simulador de desgaste acelerado confirmaron que las mezclas que emplean el bioligante presentaron un buen resultado mecánico, siendo la mezcla bioasfáltica con áridos vírgenes la que menor deformación acumula.

Palabras Clave: biobetún, mezcla bioasfáltica, material fresado, simulador desgaste acelerado.

1 Introducción

En los últimos años, la transición hacia la construcción de carreteras más sostenibles ha fomentado el uso de materiales reciclados y de ligantes alternativos con el fin de reducir el consumo de materias primas vírgenes y de las emisiones asociadas a la fabricación de mezclas asfálticas [1]–[3]. Por ello, el material fresado RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) se ha convertido en una fuente importante de áridos y ligante envejecido [4]. Su reutilización permite reducir el consumo de recursos naturales finitos y promover la economía circular. No obstante, su incorporación conlleva problemas relacionados con su alta rigidez y fragilidad del ligante envejecido, lo que puede comprometer el comportamiento mecánico y la durabilidad de la mezcla asfáltica [5]. Una alternativa viable es la utilización de bioligantes, especialmente los compuestos por la mezcla de betún duro y aceite rejuvenecedor, ya que su empleo podría mejorar ligeramente las propiedades del ligante envejecido [6]. Estos ligantes proporcionan una estructura principal de asfaltenos, los cuales, combinados con los aceites rejuvenecedores ayudan a compensar el equilibrio asfalteno-maltenos en el ligante final.

Se han llevado a cabo distintos estudios que muestran que el comportamiento mecánico de las mezclas bioasfálticas ha sido analizado mediante la estabilidad Marshall, la resistencia a las deformaciones plásticas, la fatiga o el módulo de rigidez [7]. Los resultados obtenidos muestran que el empleo de rejuvenecedores permite mejorar ciertas propiedades mecánicas y funcionales, pero su eficacia depende en gran parte del tipo de RAP y de la compatibilidad entre los materiales empleados. Asimismo, factores como el grado de envejecimiento del ligante obtenido, el porcentaje de RAP incorporado y la proporción de aceite rejuvenecedor empleado influyen significativamente en el comportamiento final de la mezcla.

Pese a ello, no es suficiente analizar el comportamiento inicial de las mezclas, sino que resulta fundamental evaluar su durabilidad frente al envejecimiento, a cargas cíclicas, así como a ciclos térmicos. Por lo tanto, la validación a escala real mediante tramos piloto ha adquirido mayor interés. No obstante, los resultados siguen siendo altamente dependientes del tipo de RAP, del porcentaje de incorporación, así como de los rejuvenecedores empleados y de la compatibilidad entre materiales [8].

El presente trabajo evalúa el comportamiento mecánico de mezclas cerradas en las que se analiza el reemplazo del ligante por el bioasfalto. Asimismo, también se evalúa mecánicamente la incorporación de RAP. Por último, las mezclas serán ensayadas a una mayor escala en el simulador de desgaste acelerado con el fin de analizar su respuesta ante cargas cíclicas.

2 Materiales y métodos

2.1 Materiales

Para el desarrollo de este trabajo se han empleado áridos ofíticos en la fracción gruesa y calizos para la fracción fina, así como para el polvo mineral de aportación. Sus propiedades se recogen en la Tabla 1.

Los ligantes empleados fueron el betún convencional B50/70 y el experimental compuesto por betún natural sólido y aceite rejuvenecedor. Sus principales propiedades se recogen en la Tabla 2 y en la Tabla 3.

Tabla 1. Principales características físicas de los áridos

Propiedad	Norma	Valor	Unidad
Árido ofítico			

Peso específico	EN 1097-6	2.787	g/cm ³
Coefficiente de Los Ángeles	EN 1097-2	13	%
Coefficiente de pulimento acelerado	EN 1097-8	60	-
Índice de lajas	EN 933-3	8	%
Árido calizo			
Peso específico	EN 1097-2	2.705	g/cm ³
Coefficiente de Los Ángeles	EN 1097-2	25	%
Equivalente de arena	EN 933-8	78	

Tabla 2. Principales características físicas del betún B50/70

Propiedad	Norma	Valor
Peso específico (g/cm ³)	UNE-EN 15326	1.045
Penetración (mm/10)	UNE-EN 1426	65
Punto de reblandecimiento (°C)	UNE-EN 1427	48.4
Índice de penetración	UNE-EN 12591	-1.0

Tabla 3. Principales características físicas del ligante experimental

Propiedad	Norma	Valor	
		Betún natural sólido	Aceite rejuvenecedor
Forma	-	Pulverulento	Líquido
Color	-	Negro mate	Amarronado
Peso específico (g/cm ³)	EN 1183-1	1.020	0.990
Asfaltenos (%)	-	69 – 71	-
Punto de reblandecimiento (°C)	-	165 – 185	-
Tamaño de partícula (mm)	-	<0.5	-
Viscosidad dinámica (25°C; 10s ⁻¹ ; mPa·s)	ASTM D 3236-88	-	1500
Pérdida de materia volátil total (170°C; %)	-	-	≤1
pH (25°C)	-	-	7-8

2.2. Diseño de las mezclas asfálticas

Para llevar a cabo este estudio se emplearon mezclas asfálticas del tipo hormigón asfáltico con un tamaño máximo de árido de 16mm (AC16). La curva granulométrica empleada para cada mezcla se muestra en la Figura 1.

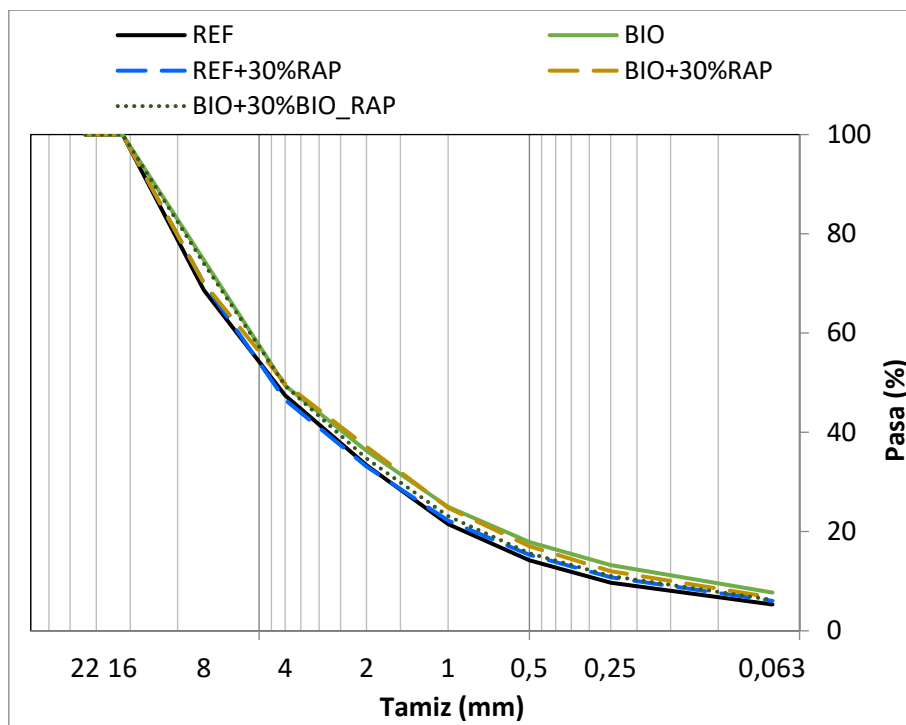


Figura 1. Ajuste granulométrico

En este estudio se emplea una mezcla de referencia y una experimental con el bioligante objeto de análisis. Se realiza también el estudio de incorporar un 30% de material fresado a ambas mezclas. Finalmente, se evalúa un 30% de reemplazo en la mezcla experimental incorporando mezcla bioasfáltica artificialmente envejecida. A continuación, se recogen las mezclas evaluadas en la Tabla 4.

Tabla 4. Nomenclatura de las distintas mezclas analizadas.

Mezclas	Ligante	Áridos vírgenes	Material fresado convencional (RAP)	Mezcla bioasfáltica envejecida (BIO_RAP)
REF	B50/70	100%	-	-
BIO	BIO	100%	-	-
REF+30%RAP	B50/70	70%	30%	-
BIO+30%RAP	BIO	70%	30%	-
BIO+30%BIO_RAP	BIO	70%	-	30%

2.3 Plan de ensayos

2.3.1. Ensayos mecánicos

Las distintas mezclas fueron sometidas a los ensayos mecánicos que recoge el PG-3 para mezclas cerradas en España. Dichos ensayos consisten en la determinación del contenido de huecos (EN 12697-8), sensibilidad al agua (EN 12697-12) y deformación en pista (EN 12697-22).

2.3.2. Ensayo de desgaste

Por último, las distintas mezclas fueron evaluadas mediante un simulador de desgaste acelerado. Para ello, se fabricaron cuatro losas de gran tamaño para cada tipo de mezcla analizada, las cuales fueron ensayadas durante un millón de ciclos de carga. Finalmente, se estudió la evolución de la deformación plástica mediante un láser escáner y el nivel de deterioro de manera visual de cada mezcla tras el ensayo.

3 Resultados

3.1. Ensayos mecánicos.

Los resultados mecánicos muestran que todas las mezclas presentan un contenido de huecos dentro de los límites establecidos por el PG-3, comprendidos entre el 4 y el 6% (Figura 2).

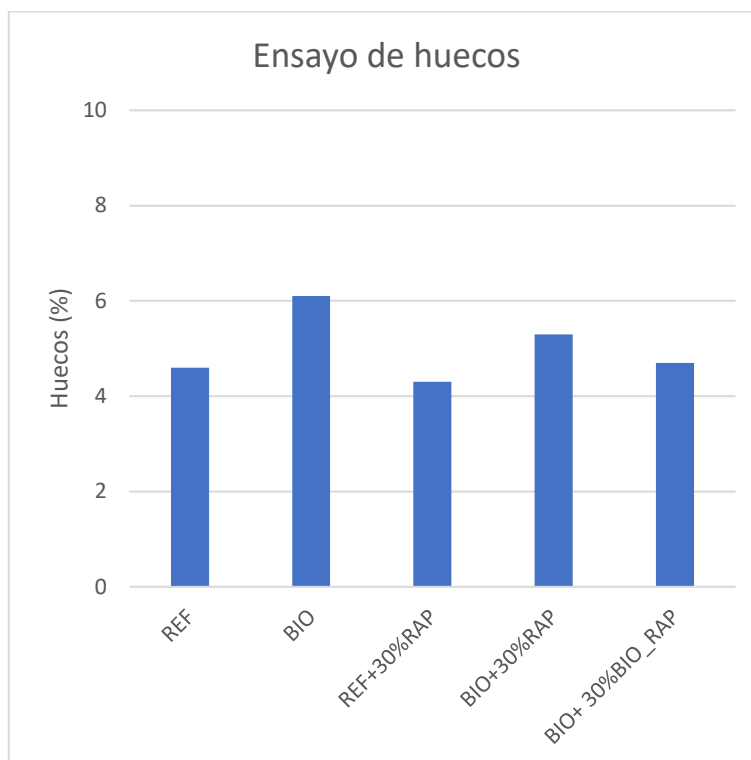


Figura 2. Ensayo de huecos

El ensayo de sensibilidad al agua (Figura 3) muestra que la mezcla experimental ‘BIO’ mantiene la resistencia en seco, pero presenta un incremento de la resistencia en condiciones húmedas, mejorando consecuentemente la ratio de sensibilidad.

Cuando se incorpora material fresado a la mezcla de referencia, se produce un aumento considerablemente de ambas resistencias. No obstante, la ratio de sensibilidad decae, situándose por debajo del 80%. Cuando, en vez de emplear el B50/70, se utiliza el ligante experimental, las resistencias disminuyen considerablemente, aunque la ratio de sensibilidad aumenta, superando incluso el 100%. Por último, la mezcla experimental que incorpora mezcla bioasfáltica envejecida mantiene las resistencias en seco, pero reduce su resistencia en condiciones húmedas, disminuyendo así también la ratio de sensibilidad.

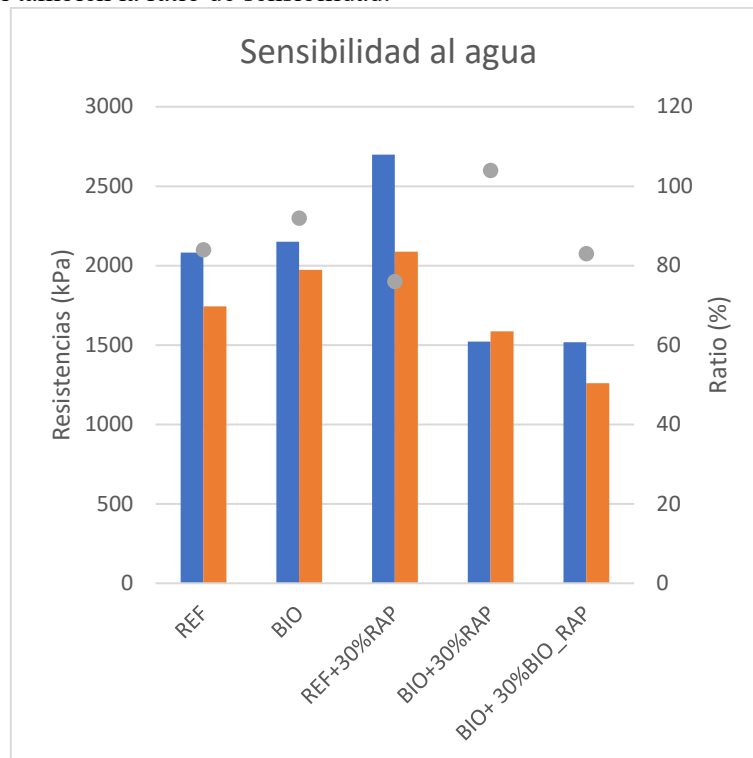


Figura 3. Ensayo de sensibilidad al agua

Por último, todas las mezclas ensayadas presentan una mejora en la resistencia a las deformaciones plásticas respecto a la mezcla de referencia (Figura 4). Aquellas que incorporan el bioligante presentan la mayor resistencia a las deformaciones, superando incluso a la mezcla ‘REF+30%RAP’. No obstante, todas ellas, a excepción de la referencia, cumplen con el límite para condiciones exigentes de tráfico pesado (0,07 mm/1000 ciclos).

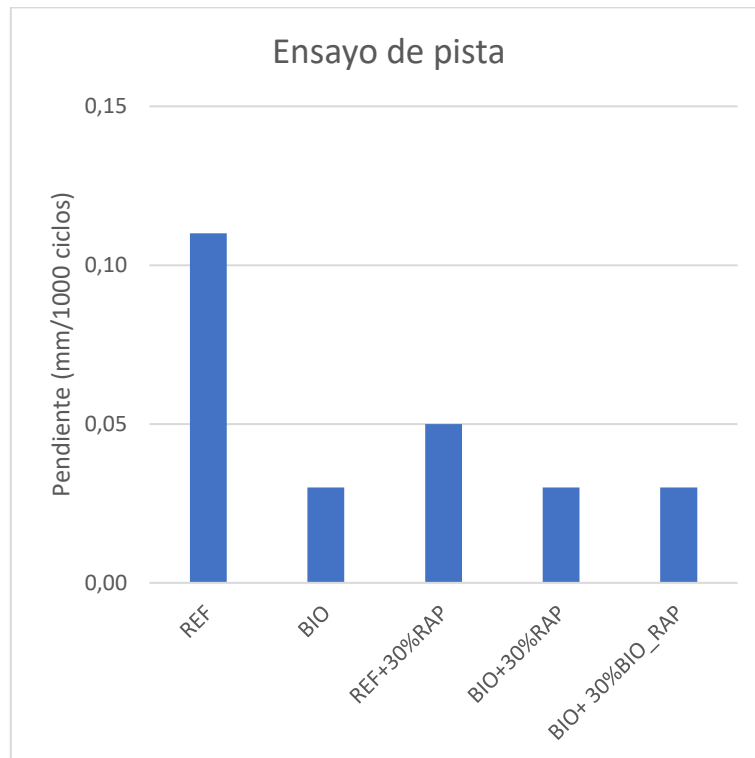


Figura 4. Ensayo de pista

3.2. Ensayo de desgaste

El ensayo de desgaste permitió evaluar de manera rápida y clara el deterioro y deformación producido por el simulador. En la Figura 5 se aprecia que en la mezcla experimental 'BIO' la deformación alcanzada es considerablemente inferior que la mezcla de referencia. Este comportamiento se aprecia desde los primeros ciclos de ensayo.

La incorporación de material fresado permite realizar un análisis adicional, pues el comportamiento del RAP se traduce en una mayor rigidez en la mezcla. Por este motivo, la mezcla experimental que incorpora material bioasfáltico artificialmente envejecido, 'BIO+30%BIO_RAP', es la que presenta la menor deformación. No obstante, las deformaciones del resto de mezclas son solo ligeramente superiores a las registradas por esta última.

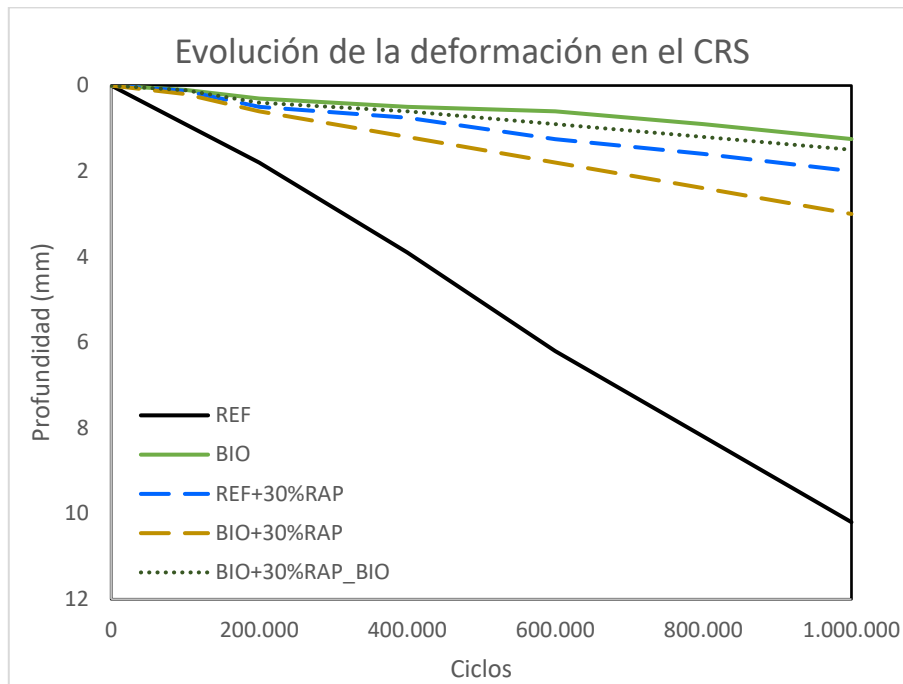


Figura 5. Evolución de la deformación en el CRS

4 Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten concluir que el uso del bioligante propuesto a partir de asfalto duro y aceite rejuvenecedor permite fabricar mezclas asfálticas con un comportamiento mecánico compatible con los requisitos del PG-3.

El empleo del bioligante mejoró el ratio de sensibilidad al agua, tanto en las mezclas que solo contenían árido virgen como en las que incorporaban un porcentaje de RAP.

Al incorporar material fresado la rigidez de las mezclas se vio incrementada debido a la incorporación de ligante envejecido. No obstante, el uso del bioligante permitió compensar este efecto, reduciendo la rigidez de las mezclas.

Las mezclas que incorporaban el bioligante mostraron una resistencia mayor a las deformaciones plásticas en el ensayo de pista.

El ensayo en el simulador de desgaste acelerado ratificó que la combinación de bioligante y RAP presentan menores deformaciones plásticas que la mezcla convencional, siendo destacable la mezcla experimental fabricada con áridos vírgenes.

No obstante, es necesario continuar investigando para evaluar la durabilidad y el comportamiento de estas mezclas a largo plazo en condiciones reales de tráfico y ambientales.

5 Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación otorgada por el programa marco de investigación e innovación Horizonte Europa de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención No. 101103698 (LIAISON).

6 Referencias

- [1] M. Zaumanis, R. B. Mallick, and R. Frank, '100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis', *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 92, no. July 2015, pp. 230–245, 2014, doi: 10.1016/j.resconrec.2014.07.007.
- [2] G. G. Al-khateeb, S. A. Alattieh, W. Zeiada, and C. Castorena, 'State-of-the-Art on the Behavior of Bio-Asphalt Binders and Mixtures', *Molecules*, pp. 1–47, 2024.
- [3] E. Gaudenzi, F. Cardone, X. Lu, and F. Canestrari, 'The use of lignin for sustainable asphalt pavements: A literature review', *Constr. Build. Mater.*, vol. 362, no. November 2022, p. 129773, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129773.
- [4] H. Ziari, M. R. M. Aliha, A. Moniri, and Y. Saghafi, 'Crack resistance of hot mix asphalt containing different percentages of reclaimed asphalt pavement and glass fiber', *Constr. Build. Mater.*, vol. 230, p. 117015, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117015.
- [5] Z. H. Al-Saffar *et al.*, 'A review on the durability of recycled asphalt mixtures embraced with rejuvenators', *Sustain.*, vol. 13, no. 16, pp. 1–24, 2021, doi: 10.3390/su13168970.
- [6] M. C. Cavalli, M. Zaumanis, E. Mazza, M. N. Partl, and L. D. Poulikakos, 'Aging effect on rheology and cracking behaviour of reclaimed binder with bio-based rejuvenators', *J. Clean. Prod.*, vol. 189, pp. 88–97, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.305.
- [7] A. M. Al-Sabaei, M. B. Napiah, M. H. Sutanto, W. S. Alaloul, and A. Usman, 'A systematic review of bio-asphalt for flexible pavement applications: Coherent taxonomy, motivations, challenges and future directions', *J. Clean. Prod.*, vol. 249, p. 119357, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119357.
- [8] M. Alae, L. Xu, Z. Cao, X. Xu, and F. Xiao, 'Fatigue and intermediate-temperature cracking performance of rejuvenated recycled asphalt binders and mixtures: A review', *J. Clean. Prod.*, vol. 384, no. November 2022, p. 135587, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135587.