

NUEVO BETÓN MODIFICADO CON POLÍMEROS PARA MAXIMIZAR EL USO DE MEZCLA BITUMINOSA RECICLADA

Helena Miera-Dominguez¹, Irune Indacoechea-Vega², Manuel E. Lagos-Varas³, Dario Prieto-Quintana⁴,
David Salvo-Ulloa⁵ y Daniel Castro-Fresno⁶

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

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

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

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

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

⁶ GITECO, Universidad de Cantabria, Santander, España, castrod@unican.es

Resumen

El uso de betunes modificados con polímeros (PMB) mejora el rendimiento y la durabilidad de los pavimentos asfálticos. No obstante, el reciclaje de mezclas envejecidas que contienen PMBs presenta dificultades, especialmente para recuperar la actividad polimérica residual. Para afrontar este reto, el proyecto CIRCUIT, financiado por el programa Horizon Europe y con un enfoque más amplio orientado al desarrollo de soluciones integrales para infraestructuras sostenibles, incluye entre sus líneas de trabajo la evaluación de un ligante experimental capaz de reactivar los polímeros envejecidos y permitir la fabricación de mezclas recicladas de alta calidad. Este estudio de laboratorio analizó el comportamiento mecánico de mezclas de hormigón asfáltico (AC) con 30 % y 50 % de material fresado (RA), empleando 3,0 % y 2,5 % de betún virgen, respectivamente. Se comparó un PMB convencional con el ligante innovador desarrollado en el proyecto. Los resultados de los ensayos realizados a estas mezclas indican que el ligante experimental es prometedor, aunque se requieren estudios a mayor escala.

Palabras Clave: asfalto recuperado; betún modificado con polímeros; rendimiento mecánico.

1 Introducción

La mejora del comportamiento mecánico y de la durabilidad de las mezclas asfálticas en pavimentos flexibles ha constituido un objetivo fundamental en la ingeniería durante décadas. En este contexto, el empleo de betunes modificados con polímeros (PMB) se ha consolidado como una solución eficaz para incrementar la resistencia frente a diversos mecanismos de deterioro, como la deformación permanente, la fatiga y la susceptibilidad térmica (Han et al., 2025; B. Li et al., 2025). Estas mejoras se deben principalmente a la formación de una red polimérica tridimensional en el interior del betún, que actúa como refuerzo viscoelástico y optimiza la respuesta del material ante cargas cíclicas y variaciones de temperatura (Munera & Ossa, 2014).

Sin embargo, el incremento progresivo del tráfico y las condiciones ambientales cada vez más exigentes han impulsado no solo el desarrollo de nuevas formulaciones de mezclas y ligantes, sino también la reutilización de materiales existentes en línea con los principios de sostenibilidad y economía circular (Kaur & Biligiri, 2025; Moura et al., 2025). En este sentido, la incorporación de cantidades significativas de asfalto reciclado (RA), procedente de capas envejecidas, se ha

convertido en una práctica cada vez más extendida (Fan et al., 2025; Xu et al., 2025). El uso de RA contribuye a reducir el consumo de recursos naturales, disminuir los costes y mitigar el impacto ambiental asociado a materiales de origen fósil (M. Li et al., 2025; Usanga et al., 2025). No obstante, la utilización de elevados porcentajes de RA, superiores al 30 %, plantea importantes retos técnicos, especialmente cuando el betún residual corresponde a un PMB envejecido (Fan et al., 2025; Nouali et al., 2025).

Aunque los ligantes PMB mejoran la respuesta viscoelástica de las mezclas convencionales, no garantizan una mejora de las propiedades mecánicas y reológicas del ligante envejecido presente en el RAP, ya que su función no está orientada a la regeneración o rejuvenecimiento del material degradado (Suchismita & Singh, 2023). Esto se explica por la limitada interacción entre el polímero del ligante virgen y el ligante envejecido, lo que reduce tanto su eficacia como su capacidad de modificación. Esta interacción depende de un mezclado inicial seguido de difusión molecular, que suele ser insuficiente debido al poco tiempo y las temperaturas de fabricación, impidiendo una adecuada homogeneización entre ambos ligantes (Alavi et al., 2024; Zaumanis et al., 2023). Por otro lado, la mayor viscosidad de los PMB respecto a los ligantes convencionales dificulta la activación del ligante envejecido, especialmente considerando los reducidos tiempos de mezclado habituales en planta (Alavi et al., 2024). Este efecto puede dar lugar a fallos prematuros, asociados a una menor resistencia frente a la acumulación de cargas y a una pérdida de flexibilidad del material (Alavi et al., 2013). Asimismo, aunque los PMB mejoran el comportamiento de las mezclas convencionales, no logran compensar completamente la fragilización derivada de la oxidación del RA, lo que puede traducirse en un comportamiento frágil a largo plazo, especialmente a bajas temperaturas. En consecuencia, la presencia de una fase de ligante envejecido en mezclas con RA puede limitar la plena eficacia de la modificación polimérica en el ligante bituminoso.

Ante esta problemática, adquiere especial relevancia el desarrollo de betunes experimentales diseñados específicamente para interactuar con el RA envejecido. Este tipo de ligantes no solo pretende recuperar la viscosidad del material, sino también reactivar, en la medida de lo posible, la funcionalidad de la red polimérica. Este enfoque representa un cambio respecto a las técnicas tradicionales basadas en rejuvenecedores, al orientarse hacia la reconstrucción de la estructura polimérica original. En este contexto, el proyecto CIRCUIT (Horizon Europe), cuyo enfoque global es desarrollar soluciones holísticas para impulsar infraestructuras de transporte circulares, resilientes y sostenibles, incluye entre sus líneas de investigación la validación de un betún experimental capaz de restaurar la actividad polimérica en ligantes envejecidos, posibilitando así el diseño de mezclas con altos contenidos de RA.

2 Materiales y metodología

2.1 Materiales

Por un lado, todos los materiales empleados son habituales en la fabricación de mezclas asfálticas. En la fracción gruesa se utilizó un árido ofítico, característico de algunas zonas del norte de España, que destaca por su elevada resistencia a la fragmentación y al pulimento. Para la fracción fina y el polvo mineral se empleó caliza. Las propiedades de los áridos utilizados se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de los áridos

Ensayo	Normativa	Ofita	Caliza
Coefficiente de los ángeles	EN 1097-2	13	28

Peso específico (g/cm ³)	EN 1097-6	2.787	2.705
Equivalente de arena	EN 933-8	-	78
Coefficiente de pulimento acelerado	EN 1097-8	60	-
Índice de lajas (%)	EN 933-3	8	-

Por otro lado, en este estudio se emplearon dos tipos de betún: un betún modificado con polímeros de uso comercial (PMB 45/80-65), utilizado como referencia, y un betún modificado de carácter experimental (PMB3). Las propiedades de ambos ligantes se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades de los betunes

Ensayo	Unidades	Normativa	PMB 45/80-65	PMB3
Penetración a 25 °C	dmm	EN 1426	55	100
Punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	74.1	66.8
Recuperación elástica a 25 °C	%	EN 13398	92	92
Peso específico	g/cm ³	EN 15326	1.028	1.027
Viscosidad η @160°C	MPa	EN 12595	590	290
Jnr@3,2 kPa & T=60°C	kPa-1	EN 16659	0.117	0.322
R@3,2 kPa & T=60°C	%	EN 16659	76.29	65.86

El asfalto reciclado (RA) procede de una carretera con una granulometría tipo BBTM 11A (Figura 1) y con betún modificado PMB 45/80-65, con un contenido de ligante en mezcla del 4.8%. En cuanto a las características físicas del betún recuperado, presenta una penetración de 14 dmm (según la norma EN 1426) y un punto de reblandecimiento de 77,6 °C (según la norma EN 1427).



Figura 1. Asfalto reciclado (RA) – BBTM 11A

2.2 Diseño de mezclas y preparación de muestras

Las mezclas bituminosas diseñadas en este proyecto corresponden a mezclas tipo hormigón asfáltico con un tamaño máximo de árido de 16 mm, conocidas como AC16. Las mezclas experimentales se compararon con otras de referencia elaboradas con un PMB convencional. En ambos casos, el contenido de RA fue del 30 % o del 50 %.

Todas las mezclas se fabricaron siguiendo el mismo procedimiento, con el fin de garantizar una comparación fiable entre ellas. Para la incorporación del RA, este material se sometió previamente a un acondicionamiento en estufa a 110 °C durante dos horas. La temperatura de

fabricación se fijó en 165 °C para ambos tipos de betún, de acuerdo con las recomendaciones de los proveedores.

Además, para asegurar una distribución homogénea de la temperatura al incorporar hasta un 50 % de RA, se incrementó la temperatura de los áridos hasta 190 °C. De este modo, se logró alcanzar una temperatura media de la mezcla acorde con los valores recomendados por los suministradores de betún. En la Tabla 4 se presentan las distintas mezclas diseñadas.

Tabla 3. Mezclas bituminosas

Mezcla	% RA	Tipo de betún	% de betún virgen
30%RA-PMB	30	PMB 45/80-65	3.0
30%RA-PMB3	30	PMB3	3.0
50%RA-PMB	50	PMB 45/80-65	2.5
50%RA-PMB3	50	PMB3	2.5

2.3 Plan de trabajo experimental

Las mezclas asfálticas desarrolladas en este proyecto se evaluaron mediante diversos ensayos normalizados: contenido de huecos (EN 12697-8), sensibilidad al agua (EN 12697-12) y ensayo de rodadura (EN 12697-22).

Para el contenido de huecos, se emplearon probetas cilíndricas tipo Marshall compactadas con 75 golpes por cara, conforme a la norma EN 12697-30. Tras un periodo de enfriamiento de 24 horas, se determinaron la densidad aparente y el porcentaje de huecos.

La sensibilidad al agua se evaluó en probetas cilíndricas tipo Marshall, en este caso compactadas con 50 golpes por cara. El análisis se realizó mediante la determinación de la resistencia a tracción indirecta (ITS) en condiciones secas y húmedas. Las probetas se sometieron a una carga diametral aplicada a través de su sección circular, con una velocidad constante de 50 mm/min hasta la rotura, registrándose la carga máxima alcanzada. En el caso de las condiciones húmedas, las muestras se acondicionaron previamente mediante su inmersión en un baño de agua a 40 °C durante 72 horas. El ensayo se llevó a cabo a una temperatura de 15 °C en ambos casos, y la sensibilidad al agua se evaluó mediante el índice ITSR, definido como la relación entre las resistencias obtenidas.

El ensayo de rodadura se utilizó para analizar la resistencia de las mezclas a la deformación plástica. Para cada tipo de mezcla se fabricaron dos losas de dimensiones 410 × 260 × 50 mm, que fueron acondicionadas y ensayadas a 60 °C.

3 Resultados y discusión

3.1 Contenido de huecos

Los resultados ilustrados en la Figura 2 muestran que la mezcla con betún experimental y un 30 % de RA presenta una reducción notable del contenido de huecos en comparación con su equivalente de referencia con PMB 45/80-65, lo que indica una estructura más compacta y, posiblemente, una mejor interacción entre el ligante experimental y los materiales reciclados.

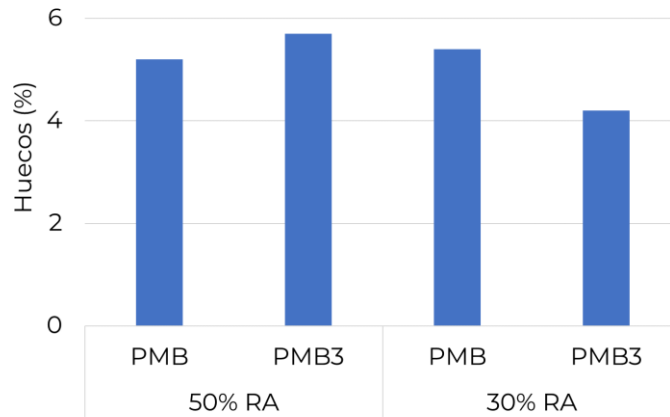


Figura 2. Resultados del ensayo de contenido de huecos

Sin embargo, al aumentar el contenido de RA hasta el 50 %, la mezcla con betún experimental muestra un ligero incremento del contenido de huecos. Este comportamiento podría estar relacionado con un aumento de la rigidez de la mezcla debido al mayor porcentaje de RAP, lo que dificultaría el proceso de compactación. No obstante, esta interpretación debe tomarse con cautela, ya que las muestras con un 50 % de RA presentan una mayor dispersión de los resultados. En consecuencia, no existen evidencias suficientes para afirmar diferencias significativas entre las mezclas de referencia y experimentales con este contenido de RA.

3.2 Sensibilidad al agua

La Figura 3 presenta los resultados del ensayo de sensibilidad al agua en condiciones secas y húmedas, observándose que todas las mezclas cumplen con los requisitos mínimos establecidos. En estado seco, las mezclas fabricadas con PMB muestran valores de resistencia superiores a los obtenidos con el betún experimental. Esta diferencia se acentúa al incrementar el contenido de RA en la mezcla: con un 50 % de RA, la resistencia de la mezcla con betún experimental disminuye un 26 %, mientras que para un 30 % de RA la reducción es del 18 %. Este descenso puede estar relacionado con la menor rigidez del betún experimental.

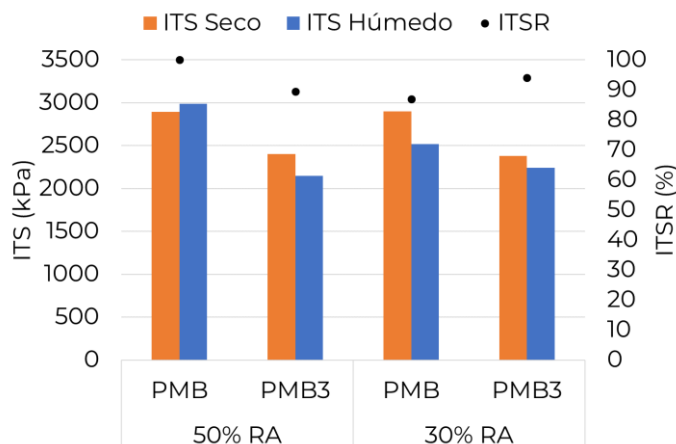


Figura 3. Resultados del ensayo de sensibilidad al agua

En condiciones húmedas, las mezclas con betún experimental presentan un comportamiento relativo más favorable. Para un 30 % de RA, el índice ITSR alcanza el 94 % con el betún experimental, superando el 87 % obtenido con el PMB. Este resultado podría explicarse por una mayor presencia de polímeros en el ligante experimental, lo que favorecería la adhesión en presencia de humedad. En el caso de las mezclas con un 50 % de RA, la resistencia ITS disminuye en ambos casos bajo condiciones húmedas, aunque el valor de ITSR se mantiene ligeramente superior para el betún experimental.

3.3 Ensayo de rodadura

En la Figura 4 se observa que la pendiente, que representa la velocidad de acumulación de deformación por cada mil ciclos, tiende a incrementarse cuando se utiliza el betún experimental. Este comportamiento podría explicarse por una mayor capacidad elástica del betún experimental, lo que permitiría que la mezcla se deforme sin fisurarse.

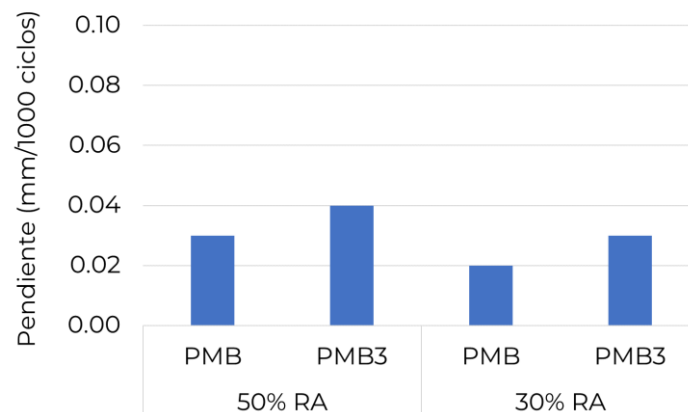


Figura 4. Resultados del ensayo de rodadura

Un aspecto relevante es la variabilidad de los resultados. Al utilizar el betún experimental, la dispersión de los datos se reduce notablemente para cualquier contenido de RA. Esta diferencia es especialmente acusada en el caso del 50 %, donde la desviación estándar disminuye de 0,01 a 0,0001 mm/1000 ciclos. Por tanto, el empleo del betún experimental parece favorecer una respuesta mecánica más uniforme en la mezcla.

4 Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio indican que el betún experimental desarrollado en el marco del proyecto CIRCUIT constituye una alternativa técnicamente viable para la fabricación de mezclas asfálticas recicladas con altos contenidos de RA. En particular, las mezclas tipo AC16 con incorporaciones del 30 % y 50 % de RA, junto con reducidas dosificaciones de betún virgen (3,0 % y 2,5 %, respectivamente), mostraron un comportamiento mecánico similar o incluso superior al de las mezclas elaboradas con un PMB convencional.

El proceso de fabricación favorece una adecuada dispersión del betún en presencia de RA y facilita su activación, lo que da lugar a mezclas homogéneas y estables, incluso con elevados porcentajes de material reciclado. La disminución del contenido de betún virgen sin afectar negativamente a las propiedades funcionales refuerza la tendencia hacia un uso más eficiente de

los recursos, contribuyendo a reducir el impacto ambiental y económico de las soluciones tradicionales.

En conjunto, este estudio aporta evidencias experimentales que respaldan el potencial de aplicación de este nuevo betún en contextos que requieren altas prestaciones estructurales, en línea con los principios de sostenibilidad y economía circular promovidos por la Unión Europea. No obstante, para garantizar su implantación a escala real y evaluar su durabilidad a largo plazo, resulta imprescindible avanzar hacia ensayos piloto a nivel de planta y la ejecución de tramos experimentales en condiciones de servicio.

5 Referencias

- [1] Han, X., Niu, X., Zhang, Z., Xu, S., Zhou, X., Cao, Z., Feng, Z., & Yu, J. (2025). *Investigation on road and aging performance of rejuvenated SBS modified bitumen mixtures: Towards sustainable modified bitumen pavement*. *Construction and Building Materials*, 485, 141894. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2025.141894>
- [2] Li, B., Stüwe, S., Mirwald, J., & Hofko, B. (2025). *Characterizing the diversity of PmB aging with application to pavements*. *Fuel*, 400, 135803. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2025.135803>
- [3] Munera, J. C., & Ossa, E. A. (2014). *Polymer modified bitumen: Optimization and selection*. *Materials & Design (1980-2015)*, 62, 91–97. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2014.05.009>
- [4] Kaur, H., & Biligiri, K. P. (2025). *Advanced thermochemical characterization and environmental assessment of modified asphalt-rubber incorporated with industrial wastes: A novel strategy to promote circular economy in sustainable road construction*. *Resources, Conservation and Recycling*, 218, 108258. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2025.108258>
- [5] Moura, C. F. N., Loureiro, C. D. A., Silva, H. M. R. D., Oliveira, J. R. M., & Rodrigues, M. (2025). *Optimizing steel slag and reclaimed asphalt incorporation in hot mix asphalt: From lab validation to full-scale application towards circular economy*. *Construction and Building Materials*, 490, 142561. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2025.142561>
- [6] Fan, Y., Yu, H., Zhou, Y., Yang, R., Yang, J., & Huang, W. (2025). *Fracture characteristics and fracture surface recognition of epoxy-recycled mixtures with high reclaimed asphalt pavement (RAP) content toughened by SBS/CR-CSR*. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 139, 105087. <https://doi.org/10.1016/J.TAFMEC.2025.105087>
- [7] Xu, G., Shen, Z., Hao, S., Du, M., & Hu, J. (2025). *Mitigating RAP variability through detailed particle size classification: Applications in high RAP content asphalt mixtures*. *Case Studies in Construction Materials*, 23, e04993. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2025.E04993>
- [8] Li, M., Yuan, J., Jin, T., Wang, W., Sun, Y., & Cheng, H. (2025). *Investigation of performance evolution in recycled asphalt mixtures: The impact of virgin and RAP binder blending*. *Construction and Building Materials*, 469, 140519. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2025.140519>
- [9] Usanga, I. N., Inyang, E. O., & Ikeagwuani, C. C. (2025). *Investigation of deformation characteristics of asphalt mixtures containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binders using laboratory simulations*. *Hybrid Advances*, 10, 100426. <https://doi.org/10.1016/J.HYBADV.2025.100426>
- [10] Nouali, M., Dony, A., Vignaud, S., & Carter, A. (2025). *Effect of aging kinetics on the fatigue behavior of asphalt mixtures incorporating various RAP contents*. *Transportation Engineering*, 19, 100312. <https://doi.org/10.1016/J.TRENG.2025.100312>

[11] Suchismita, A., & Singh, D. (2023). *Rheological performance of bitumen mixed with laboratory simulated polymerized RAP binders*. Construction and Building Materials, 400, 132706. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.132706>

[12] Alavi, M. Z., Amani, S., & Hosseinzadeh, S. (2024). *Evaluation of degree of blending and interaction between aged and virgin asphalt binders using rheological and fracture measurements*. Case Studies in Construction Materials, 21, e03528. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2024.E03528>

[13] Zaumanis, M., Poulikakos, L., Arraigada, M., Kunz, B., Schellenberg, U., & Gassmann, C. (2023). *Asphalt recycling in polymer modified pavement: A test section and recommendations*. Construction and Building Materials, 409, 134005. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.134005>

[14] Alavi, M. Z., Hajj, E. Y., & Morian, N. E. (2013). *Approach for quantifying the effect of binder oxidative aging on the viscoelastic properties of asphalt mixtures*. Transportation Research Record, 2373(2373), 109–120. <https://doi.org/10.3141/2373-12>