

carrreteras

4ª ÉPOCA · Nº 240 · AÑO 2023 REVISTA TÉCNICA DE LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA CARRETERA

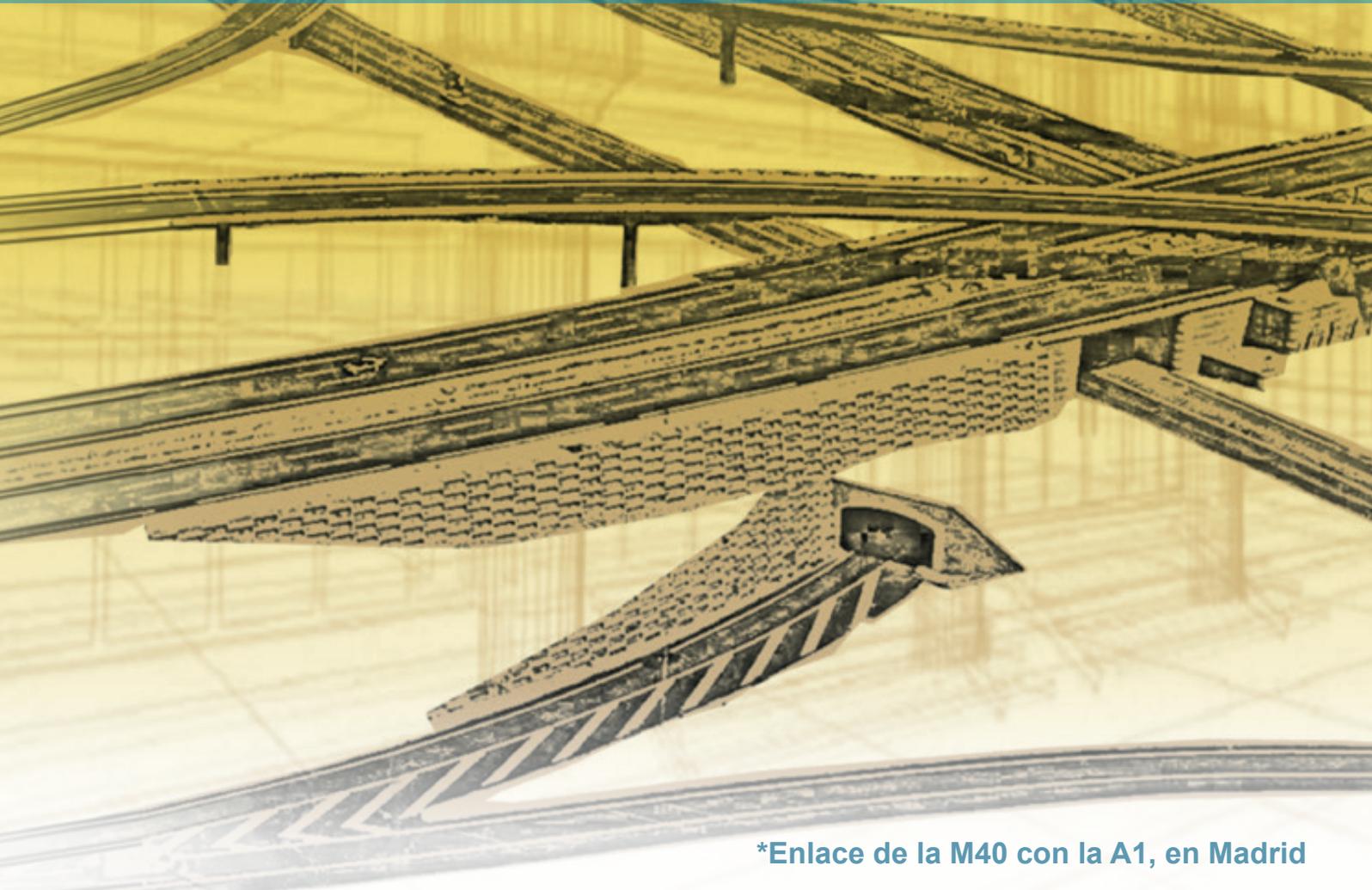
Especial



premio internacional
A LA INNOVACIÓN EN CARRETERAS

JUAN ANTONIO FERNÁNDEZ DEL CAMPO

Nouena Edición
2021 - 2022



*Enlace de la M40 con la A1, en Madrid

Comportamiento mecánico de mezclas bituminosas recicladas en frío con emulsión: sostenibilidad y economía circular en el sector de la pavimentación

trabajo finalista en la IX edición

Mechanical behavior of cold recycled asphalt mixtures with emulsion: sustainability and circular economy in the paving industry

Pablo OROSA IGLESIAS

Investigador Postdoctoral. Purdue University. Lyles School of Civil Engineering, Civil Engineering Department, West Lafayette, IN (USA)

Ignacio PÉREZ PÉREZ

Catedrático de Universidad. Universidade da Coruña (UDC), CITTEC y ETSI Caminos, Canales y Puertos, Departamento de Ingeniería Civil, A Coruña, España

Ana María RODRÍGUEZ PASANDÍN

Profesora Titular. Universidade da Coruña (UDC), CITTEC y ETSI Caminos, Canales y Puertos, Departamento de Ingeniería Civil, A Coruña, España

RESUMEN

Durante esta investigación, se analizó el comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en frío con emulsión bituminosa y 100% de material fresado (RAP). Se evaluaron su compactabilidad y propiedades volumétricas y mecánicas, considerando diferentes métodos de diseño y tipos de RAP. Se realizaron ensayos triaxiales para estudiar el desarrollo de la rigidez durante el tiempo de curado, así como los parámetros de resistencia al corte y respuesta a la deformación permanente. Los resultados obtenidos permitieron ajustar modelos de comportamiento no lineales, los cuales se utilizaron en análisis numéricos para predecir la respuesta de secciones rehabilitadas. Se observó que, después de 7 días de curado, las mezclas recicladas alcanzaron una rigidez suficiente, y se vio un desempeño particularmente adecuado con subbases tratadas con cemento.

PALABRAS CLAVE: Rehabilitación de carreteras, Reciclado en frío con emulsión, Comportamiento mecánico, Curado, Ensayos triaxiales.

ABSTRACT

This research analyzed the behavior of cold recycled bituminous mixtures with bitumen emulsion and 100% reclaimed asphalt pavement (RAP). Their compactability, volumetric and mechanical properties were evaluated, considering different design methods and types of RAP. Triaxial tests assessed the stiffness development during the curing time, shear strength parameters, and permanent deformation response. The results allowed for the adjustment of nonlinear behavior models, which were used in numerical analyses to predict the response of rehabilitated sections. After 7 days of curing, the recycled mixtures demonstrated sufficient stiffness, and the performance of the rehabilitated sections was particularly suitable with semi-rigid subbases.

KEY WORDS: Road rehabilitation, Cold recycling with emulsion, Mechanical behavior, Curing, Triaxial testing.



1. Introducción y objetivos

El calentamiento global es uno de los principales desafíos a los que se enfrenta la humanidad en la actualidad. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se han convertido en una de las principales causas de este problema y han experimentado un aumento significativo en las últimas décadas. El sector de la construcción es responsable de aproximadamente el 40% de las emisiones totales de GEI, lo que subraya la necesidad de adoptar medidas para reducir el consumo de recursos naturales, disminuir la contaminación y minimizar la generación de residuos⁽ⁱ⁾.

Con el fin de abordar esta problemática, la Comisión Europea ha establecido objetivos ambiciosos en términos de sostenibilidad y economía circular para los años 2030 y 2050⁽ⁱⁱ⁾, los cuales tienen como finalidad reducir el consumo y la huella de carbono, mejorar la eficiencia energética y de recursos, y fomentar el uso de materiales circulares.

Centrándonos específicamente en el sector de las carreteras, se estima que más del 90% de las carreteras en Europa se pavimentan con mezclas asfálticas. Tradicionalmente, la mezcla asfáltica en caliente (AC o HMA) ha sido la más utilizada, pero su ejecución requiere altas temperaturas, lo que conlleva emisiones significativas de GEI. Con el objetivo de abordar este problema, se han desarrollado en los últimos años otras tecnologías, como la mezcla asfáltica semi caliente (WMA), la mezcla asfáltica templada (HWMA) y la mezcla asfáltica en frío (CMA)⁽ⁱⁱⁱ⁾. Estas tecnologías permiten reducir las temperaturas de trabajo y, en el caso de la CMA, no requieren calentamiento, lo que redundará en beneficios medioambientales y ahorro de energía más significativos^(iv).

El paso del tiempo, las cargas del tráfico y los agentes atmosféricos provocan daños en el pavimento que disminuyen su nivel de servicio. Por tanto, es necesario realizar mantenimiento periódico y, en casos de mayor deterioro, labores de rehabilitación o reconstrucción. En este contexto, desde la década de los 70, el reciclaje de pavimentos asfálticos se ha consolidado como una técnica prometedora para reutilizar el material bituminoso fresado (RAP), lo cual tiene beneficios significativos en términos de costos y reducción de residuos. Existen diversas técnicas de reciclaje de pavimentos asfálticos, pero una de las más destacadas es el reciclaje en frío o *cold recycling* (CR), debido a que no requiere calentamiento y permite la incorporación del RAP como parte sólida de las nuevas mezclas. Cuando se lleva a cabo *in situ*, esta técnica se conoce como reciclado en frío *in situ*, o *cold in-place recycling* (CIR), y es una técnica altamente versátil y adecuada para abordar problemas como fisuras, baches o deformaciones menores. Durante el CIR, se realiza primero el fresado de la capa superficial del pavimento dañado, seguido de la mezcla de este material con un agente cohesivo, como una emulsión bituminosa o espuma de betún. Una vez mezclada, esta



Foto 1. Ejecución de un CIR. Fotografía facilitada por la Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas, ATEB.

nueva mezcla se extiende y compacta para formar una nueva capa de pavimento reciclado (Foto 1).

El CIR ofrece ventajas ambientales y económicas significativas^(v), pues, además de reducir las emisiones de GEI asociadas con el calentamiento del asfalto, también disminuye la cantidad de residuos generados en la construcción de carreteras y reduce la necesidad de extraer y transportar nuevos materiales, contribuyendo así a la conservación de los recursos naturales y la disminución de la contaminación. Además, se consigue reducir el tiempo de ejecución de la obra, lo que genera menos molestias para los usuarios de la vía y minimiza los inconvenientes de tráfico durante la rehabilitación de la carretera. Todo ello hace que el CIR sea una opción cada vez más utilizada^(vi), permitiendo contribuir de manera efectiva a la lucha contra el cambio climático y la transición hacia una economía circular en el sector vial.

A pesar de que el CIR ha sido ampliamente empleado en los últimos años, la heterogeneidad del RAP y la falta de suficiente conocimiento sobre el diseño, curado o comportamiento mecánico de las mezclas CIR, han llevado a un uso reducido de esta técnica, limitándose a menudo a carreteras de tráfico medio o bajo^(vii, viii). Aunque existen manuales y pautas para la implementación^(ix-x), no hay un consenso unánime ni un método compartido, por lo que el diseño se basa frecuentemente en experiencia adquirida. Particularmente, en España, durante la realización de esta investigación estaba vigente el PG-4 descrito en la Orden Circular 40/2017 sobre reciclado de firmes y pavimentos bituminosos^(xi). Si bien el CIR es una de las principales apuestas del sector de la pavimentación hacia soluciones más ecológicas, bajas en carbono y eficientes en recursos, es fundamental destacar la necesidad de establecer directrices más claras, unificadas y completas en cuanto a su diseño y caracterización. Con el objetivo de mejorar la comprensión del comportamiento mecánico evolutivo de este material, se comenzó el Proyecto BIA2016 80317-R, "Comportamiento mecánico de mezclas recicladas en frío con emulsión bituminosa y su impacto en el diseño de pavimentos: investigación del período de curado", financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España, dando lugar a la tesis doctoral del autor principal de esta investigación^(xii).

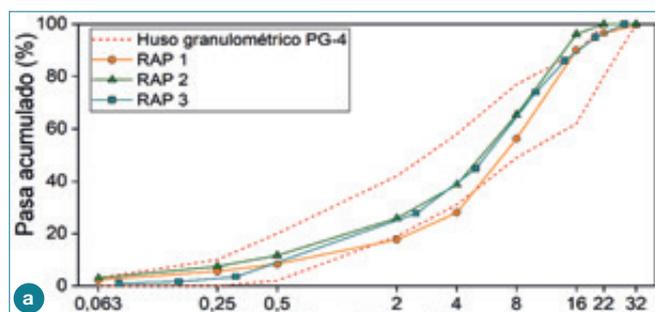


Figura 1. (a) Distribución granulométrica del RAP y husos del PG-4, (b) Detalle del RAP 1.

En el marco de este proyecto, se analizaron métodos de diseño y se buscó mejorar la comprensión sobre el comportamiento mecánico y el curado del material CIR. Además, se realizaron simulaciones numéricas del comportamiento de secciones de pavimento rehabilitadas, lo que permitió demostrar su adecuado desempeño y promover una mayor aplicación de la rehabilitación de pavimentos mediante CIR. Este enfoque de investigación y desarrollo contribuirá a reforzar el conocimiento técnico y científico en el campo del CIR, respaldando así su implementación efectiva y sostenible en proyectos de rehabilitación e impulsando una infraestructura vial más sostenible y resiliente.

2. Materiales y Estudio Experimental

2.1. Caracterización de los materiales y preparación de las mezclas

Las mezclas CIR fabricadas durante esta investigación estuvieron formadas por dos materiales fundamentales. Por un lado, la fase sólida estuvo compuesta principalmente por RAP, proveniente del fresado de carreteras desgastadas y suministrado por un contratista local. Se emplearon tres fuentes de RAP a lo largo del estudio, cuya distribución granulométrica se indica en la Figura 1a, junto con los husos granulométricos indicados en el PG-4. Por otro lado, la fase cohesiva de las mezclas estuvo formada por una emulsión bituminosa catiónica, de rotura lenta y con un 60% de betún residual, especialmente formulada para labores de reciclado de carreteras y conocida como C60B5-REC.

Para la preparación de las mezclas CIR, se empleó una mezcladora automática. Se comenzó mezclando la fase sólida con agua durante 60 segundos, seguido de la adición de la emulsión bituminosa y una mezcla adicional de 90 segundos^(xv). Este procedimiento fue validado mediante ensayos de envuelta que garantizaran el adecuado recubrimiento, y se utilizó de forma consistente en todos los trabajos de esta investigación.

En cuanto a la compactación de las probetas, se utilizó principalmente la técnica de compactación giratoria de acuerdo con la norma EN 12697-31, siguiendo las recomendaciones del PG-4 de 2017^(xv). Sin embargo, con el objetivo de evaluar la influencia de la compactación, también se emplearon compactación

según la fase del estudio. En primer lugar, se llevó a cabo el curado acelerado en estufa a 50°C durante 3 días, siguiendo las recomendaciones del PG-4. Además, con el fin de estudiar el comportamiento evolutivo de las propiedades mecánicas de este material, también se realizó un curado en condiciones ambientales, con temperatura y humedad controladas.

2.2. Estudio experimental

El plan de investigación de este proyecto se dividió en dos fases principales. En la primera fase, se comenzó (i) estudiando los métodos de diseño del PG 4 de 2017 y 2001, analizando sus diferencias y comparándolos con otros métodos internacionales. Además, se llevó a cabo un (ii) estudio exhaustivo de la compactación y las propiedades volumétricas.

En la segunda fase, se realizó un (iii) análisis detallado de la evolución de la rigidez no lineal del material CIR durante el proceso de curado. A diferencia de las tradicionales mezclas bituminosas en caliente, con comportamiento viscoelástico, el material CIR presenta además un comportamiento no lineal que depende del nivel de tensión al que se somete, similar al de un material granular suelto. Finalmente, los resultados se utilizaron como datos de entrada para realizar (iv) análisis numéricos que permitieron simular el comportamiento de secciones de firme rehabilitadas mediante CIR.

i. Diferencias entre el PG-4 de la OC 40/2017 y la OC 8/2001

Durante la realización de esta investigación, el método de diseño vigente para mezclas recicladas en frío con emulsión era el descrito en el PG-4 de la OC 40/2017^(xv), el cual reemplazó a la anterior OC 8/2001 XIV. En esta primera sección de la investigación se identificaron las principales diferencias entre estos métodos de diseño^(xv), las cuales estuvieron relacionadas con la proporción de agua añadida, la metodología de compactación y los ensayos de caracterización mecánica y sensibilidad al agua, como se resume en la Tabla 1.

	OC 8/2001	OC 40/2017
Contenido de agua añadida	$CA^* = COH^* - 0.5 - CE^*$, (1)	$CA = COH - 0.5 - CB^*$, (2)
Compactación	Compactación estática NLT-162	Compactación giratoria EN 12697-31
Resistencia y sensibilidad al agua	Inmersión-Compresión NLT-162	Resistencia a tracción indirecta EN 12697-12

*CA=Contenido de Agua, COH=Contenido Óptimo de Humedad, CE=Contenido de Emulsión, CB=Contenido de Betún Residual

Tabla 1 – Diferencias entre los métodos de diseño del PG-4 de la OC 8/2001 y la OC 40/2017.

Desde la década de los 70, el reciclaje de pavimentos asfálticos se ha consolidado como una técnica prometedora para reutilizar el material bituminoso fresado (RAP), lo cual tiene beneficios significativos en términos de costos y reducción de residuos.

Durante esta fase del estudio se analizaron 5 grupos de mezclas, de las que se obtuvieron las resistencias y sensibilidad al agua, y se determinaron los CB más adecuados en cada caso:

- Grupo Estático, diseñado de acuerdo con la OC 8/2001
- Grupo Giratorio 1 (GG1), diseñado de acuerdo con la OC 40/2017
- Grupo Giratorio 2 (GG2), diseñado de acuerdo con la OC 40/2017, pero empleando un contenido menor de agua, según la ecuación (1) de la OC 8/2001.
- Grupo Giratorio 3 (GG3), diseñado de acuerdo con la OC 40/2017, pero empleando un contenido menor de agua, según la ecuación (1) de la OC 8/2001, y aumentando en número de giros de compactación de 100 a 150.
- Grupo Giratorio 4 (GG4), diseñado de acuerdo con la OC 40/2017, pero empleando un contenido menor de agua, según la ecuación (1) de la OC 8/2001, y aumentando en número de giros de compactación de 100 a 200.
- Grupo Giratorio 5 (GG5), diseñado de acuerdo con la OC 40/2017, pero empleando un contenido menor de agua, según la ecuación (1) de la OC 8/2001, y añadiendo un 1% de cemento Portland.

ii. Propiedades volumétricas de mezclas CIR empleando distintas metodologías de compactación

Los resultados de la sección anterior revelaron cómo el método de compactación es un factor clave en la fabricación de mezclas CIR. Dado que no está claro qué procedimiento es el más adecuado^(xvi), en esta segunda sección se investigó el efecto de emplear dis-

Compactación	Cálculo de la densidad
• Giratoria, EN 12697-31, empleando de 50 a 500 giros	• Método geométrico (antes y después de curado)
• Impactos, EN 12697-34, con 50 y 75 golpes por cara	• Método de probeta impermeabilizada
• Estática, NLT-161, con 21 MPa de presión vertical	• Método seco

Tabla 2. Métodos de compactación y cálculo de densidad comparados.

tintos métodos de compactación para la preparación de una mezcla CIR con dosificación fija de 2,00% de CB y 1,92% de CA, y se calcularon sus propiedades volumétricas según tres procedimientos descritos en la norma EN 12697-6, resumidos en la Tabla 2. Estas comparaciones permitieron definir el método de compactación y de cálculo de densidad más adecuado para mezclas CIR^(viii).

iii. Comportamiento mecánico elástico no lineal y su evolución durante el período de curado

La composición de las mezclas CIR determina las particularidades de su comportamiento mecánico. El agente cohesivo habitualmente usado para aportar unión entre las partículas sólidas es una emulsión bituminosa y, dado que el betún es un material viscoelástico, así lo serán las mezclas CIR^(viii). Sin embargo, la presencia de agua añadida en este material, y que no siempre la totalidad de las partículas sólidas están recubiertas por ligante, hace que el material CIR presente un comportamiento ligeramente diferente al de las mezclas bituminosas en caliente. En este sentido, las mezclas CIR presentan un comportamiento mecánico que recuerda al de materiales granulares sueltos, dependiente del nivel de tensión al que se ven sometidos, el cual es especialmente relevante en las primeras etapas del curado, cuando el ligante aún no ha desarrollado totalmente su papel cohesivo y el contenido de agua en la mezcla es mayor.

Se ha visto que este tipo de comportamiento mecánico se puede estudiar de forma adecuada mediante ensayos triaxiales con diferentes presiones de confinamiento^(vi, xxx-xxxii), siendo un enfoque que ya está contemplado en las directrices técnicas sudafricanas para diseño de materiales estabilizados con betún (BSM)^(xxxiii). Siguiendo este planteamiento, en este estudio se emplearon tres tipos de ensayos triaxiales:

- Ensayos triaxiales dinámicos (DTx), realizados con diferentes presiones de confinamiento constante (PCC) y variación sinusoidal de la tensión desviadora según la EN 13286-7. Como resultado de los DTx se obtuvieron los módulos resilientes (Mr), no lineales y dependientes del nivel de tensión, a distintas edades de curado en condiciones ambientales, entre 0 y 60 días^(xxxiv, xxxv). Los resultados experimentales de Mr fueron ajustados mediante tres modelos predictivos dependientes de la tensión, mostrados en la Figura 2b junto a un ejemplo de resultados experimentales del Mr (Figura 2a):

- ▶ Modelo de Hicks o $k \cdot \theta^{k_2}$: $M_r = k_1 \cdot \theta^{k_2}$
- ▶ Modelo de Uzan^(xxxvii): $M_r = k_1 \cdot \theta^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$
- ▶ Modelo de la NCHRP^(xxxviii): $\frac{M_r}{P_a} = k_1 \cdot \left(\frac{\theta}{P_a}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3}$

donde los k_i son constantes del material obtenidas por regresión, θ es la tensión volumétrica, obtenida como suma de las tensiones principales $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$; σ_d es la tensión desviadora, calculada como la diferencia entre la tensión axial principal y la presión de confinamiento $\sigma_1 - \sigma_3$; τ_{oct} es la tensión octaédrica, calculada como $(\sqrt{2}/3) \cdot \sigma_d$; y P_a es la presión atmosférica de referencia (101.325 kPa).

- Ensayos triaxiales monotónicos (MTx), realizados con diferentes PCC y aumento lineal de la tensión desviadora hasta el fallo de la probeta. Los resultados de varios MTx a diferentes presiones de confinamiento se utilizaron para obtener los parámetros de corte (cohesión, C, y ángulo de fricción interna, ϕ) y las envolventes de fallo de Mohr-Coulomb a distintas edades de curado^(xxxix). En la Figura 3 se muestran gráficamente las tensiones aplicadas y los resultados obtenidos tras los ensayos MTx.

- Ensayos triaxiales cíclicos de deformación permanente (RLPDTx), descritos en la EN 13286-7, se realizaron con una PCC de 50 kPa, y hasta 90000

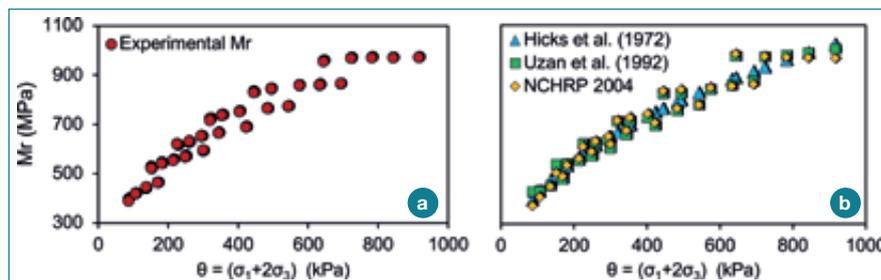


Figura 2. (a) Ejemplo del resultado de Mr de ensayo DTx y (b) modelos ajustados de Mr.

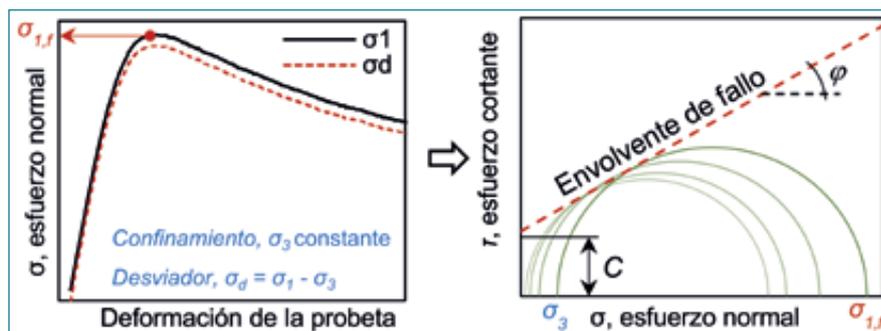


Figura 3. Ejemplo de las tensiones aplicadas y resultados obtenidos de los ensayos MTx.

ciclos de carga vertical cíclica (Figura 4a) de valor dependiente de la tensión de fallo (Stress Ratios, o SR). Se obtuvieron las curvas de deformación permanente (Figura 4b) y los SR críticos de mezclas CIR totalmente curadas.

Todos los ensayos triaxiales se realizaron utilizando el equipo que se muestra en la Figura 2, compuesto por una prensa neumática vertical encargada de aplicar las cargas axiales (σ_1); y un sistema de aire comprimido, capaz de aplicar la presión de confinamiento ($\sigma_2 = \sigma_3$) dentro de una cámara estanca. Las deformaciones se midieron mediante transductores de deformación LVDT, mientras que un ordenador central se encargó de controlar los ensayos y registrar los resultados.

iv. Simulación numérica de secciones de firme rehabilitadas

Aunque es cierto que existe experiencia práctica en el empleo de la técnica de reciclado en frío con emulsión (CIR), la falta de un conocimiento completo sobre el comportamiento mecánico evolutivo de las mezclas CIR y su vulnerabilidad a corto plazo, durante el curado, ha provocado que el uso del CIR no esté tan extendido como sería

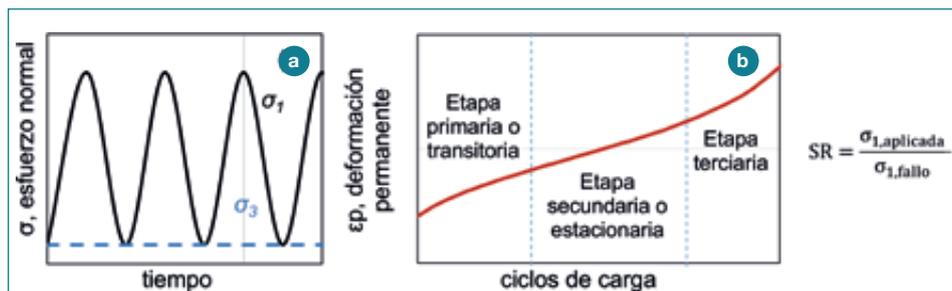


Figura 4. (a) Ejemplo de las tensiones aplicadas durante un RLPDTx y (b) curva típica de deformación permanente.

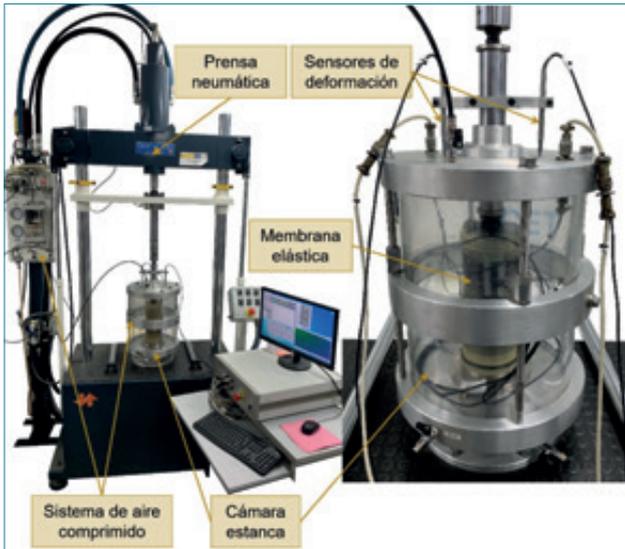


Figura 5. Equipo empleado para la realización de los ensayos triaxiales.

deseable, dados sus beneficios. Por ejemplo, el PG-4 restringe su uso a carreteras con categorías de tráfico pesado T4, T3, T2, T1 (solo como capa de base) o arceñas; y, además, se especifican ciertos rangos de espesor limitados. Sin embargo, otros factores fundamentales, como las características de la subbase existente, no se tienen en cuenta.

Siguiendo un enfoque similar al adoptado en investigaciones previas por Pérez et al. ^(VII, XXX), se realizaron simulaciones numéricas de secciones de pavimento rehabilitadas, asumiendo la presencia del material CIR estudiado como capa base (Figura 6), las cuales buscan predecir la respuesta seccional en función de distintos parámetros para optimizar así el diseño ^(XXXI). El comportamiento mecánico elástico y no lineal, dependiente del nivel tensional, fue implementado en software comercial FLAC3D (*Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3-Dimensions*), con la ayuda de los modelos predictivos ajustados a partir de los ensayos triaxiales.

Se investigó el efecto del curado, simulando la respuesta a 0, 3, 7, y 60 días, además de la influencia del espesor de la capa de base de material CIR (80, 120, 160 y 200 mm). Se consideraron dos tipos distintos de subbase (zahorra o suelocemento), y escenarios antes y después de la extensión de la capa de rodadura de mezcla en caliente (HMA). Finalmente, los resultados de nivel tensional obtenidos permitieron predecir las deformaciones permanentes esperadas en la sección de firme.

3. Resultados y discusión

3.1. Diferencias entre el PG-4 de la OC 40/2017 y la OC 8/2001

En la Figura 7 se resumen los resultados del ensayo inmersión-compresión correspondientes al grupo estático, fabricado según la OC 8/2001. Se muestran de forma conjunta los resultados de los grupos seco y

húmedo, así como el ratio de resistencia conservada para los distintos contenidos de ligante residual (CB) considerados, y los requerimientos indicados en el PG-4 de la OC 8/2001 para categorías bajas de tráfico pesado T3, T4 y arceñas.

Se observó que se cumplieron los requerimientos de resistencia en seco y tras inmersión para los CB de 1,50%, 2,00%, y 2,25%. En base a los resultados de resistencia conservada, se concluyó que el CB óptimo según este método de diseño fue el 2,00%, correspondiente a un CA del 1,92%.

Los resultados de ITS_{seco} e $ITS_{húmedo}$, así como el ratio ITSr, de los grupos giratorios (preparados según la OC 40/2017) se representan de forma conjunta en los gráficos de la Figura 8, y de nuevo, se muestran los requerimientos para las categorías de bajo tráfico pesado indicados en el PG-4 de la OC 40/2017. Como se puede observar, los resultados del ITSr (Figura 8c) son satisfactorios en distintos grupos, mientras que los resultados del ITS_{seco} e $ITS_{húmedo}$ (Figuras 8a y 8b, respectivamente) nunca alcanzan los requisitos mínimos del PG-4 de 2017, ni siquiera para las categorías de tráfico más bajas.

El GG1, diseñado de acuerdo con la OC 40/2017, no cumplió los requisitos mínimos de ITS para ningún CB, pero siempre cumplió los valores mínimos de ITSr. Al reducir el CA, GG2 no sólo sigue sin cumplir, sino que empeora los resultados. El aumento del número de giros de compactación hizo que GG3 y GG4 aumentaran el ITS

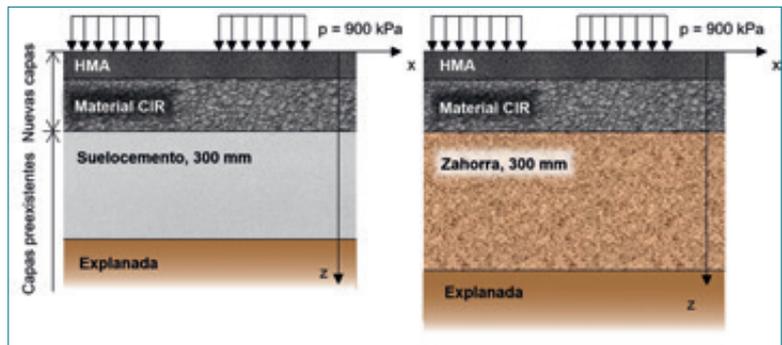


Figura 6. Secciones de firme empleadas para las simulaciones numéricas.

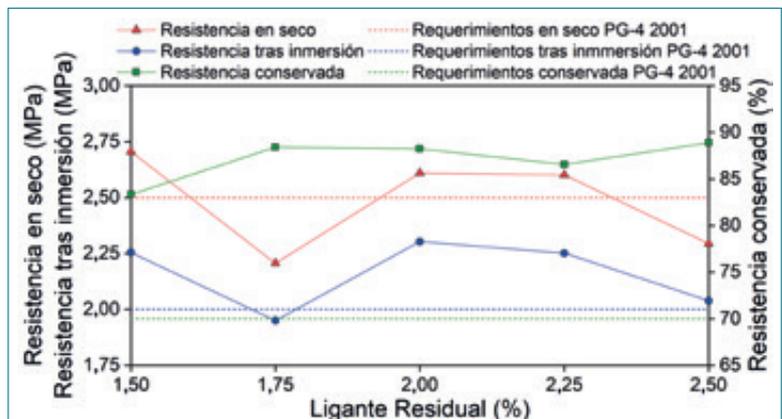


Figura 7. Resultados de inmersión-compresión del grupo estático para distintos contenidos de ligante.

La versatilidad y comodidad del método giratorio, sumado a su adecuada simulación de la compactación de campo, lo convierten en el método recomendado para mezclas CIR.

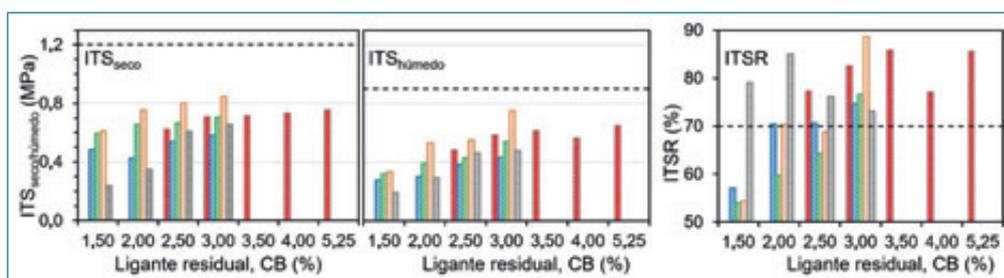


Figura 8. Resultados de resistencia a tracción indirecta y sensibilidad al agua de los grupos giratorios.

en comparación con GG2, pero siguieron sin alcanzar los requerimientos del PG-4. La adición de cemento (GG5 en comparación con GG2) condujo a mejoras en ITS para los CB de 2,50% y 3,00%, pero, para las CB de 1,50% y 2,00%, los resultados de ITS disminuyeron. Comparando los grupos compactados con 100 giros, GG1, GG2 y GG3, se vio que los mayores resultados de ITS los proporcionó la dosificación con mayor CA, indicada en la OC 40/2017.

Tras comparar con otros manuales y especificaciones internacionales, se observó que para este tipo de material los valores de ITS exigidos suelen ser significativamente menores, concluyendo que los requerimientos indicados en el PG 4 del 2017 deben ser revisados por ser poco realistas para una mezcla bituminosa reciclada en frío.

3.2. Propiedades volumétricas de mezclas CIR empleando distintas metodologías de compactación

Las densidades de las probetas preparadas con compactador giratorio, empleando cuatro métodos diferentes, se representan en la Figura 9a. La $\rho_{0,g}$ representa

la densidad geométrica antes del curado, y fue mayor que la obtenida tras el curado utilizando cualquiera de los procedimientos, debido al contenido de agua presente en los poros. Ambas curvas de densidad geométrica (antes y después del curado, $\rho_{0,g}$ y $\rho_{b,g}$, respectivamente) tienen una forma similar con un pequeño

desplazamiento vertical de aproximadamente el 2,20%, debido principalmente a dicha pérdida de agua (Figura 9a). Existió una tendencia a que los resultados de densidad por el método de probeta impermeabilizada, $\rho_{b,s}$, fuesen un 1,50% superiores, de media, a los resultados por el método geométrico, $\rho_{b,g}$. Dado el elevado contenido de huecos de aire de las CRM estudiadas, es recomendable el uso del método de probeta impermeabilizada. Es precisamente la elevada porosidad la causante de que la densidad por el método seco ($\rho_{b,d}$) sea mucho más elevada que empleando los otros métodos (13,18% más alta que $\rho_{b,s}$, y 14,31% más alta que $\rho_{b,g}$). El valor de la densidad objetivo, siendo esta el 100% de la densidad Proctor

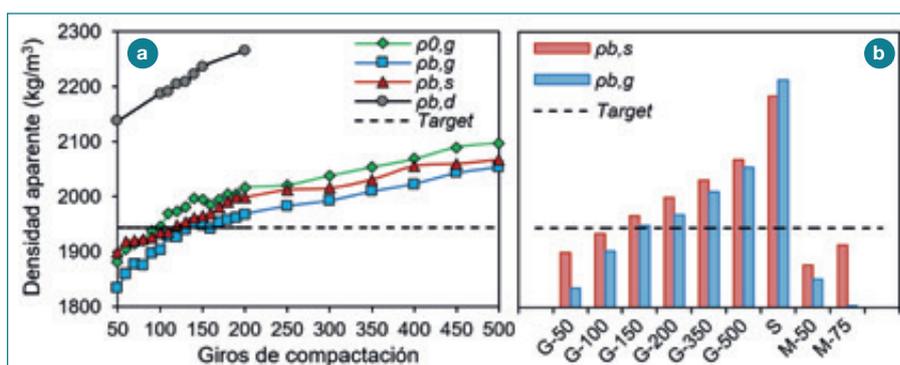


Figura 9. Densidad aparente de mezclas CIR (a) compactadas con distintos giros de compactador giratorio y (b) usando distintos métodos de compactación.

Modificado, se alcanzó después de 140 giros en el caso de la $\rho_{b,g}$, y 120 giros en el caso de la $\rho_{b,s}$.

El gráfico de barras de la Figura 9b muestra una comparación de las densidades aparentes obtenidas con los tres procedimientos de compactación. El método de impacto (Marshall) se considera inadecuado debido a las bajas densidades obtenidas (M-50 y M-75, con 50 y 75 golpes por cara, respectivamente), mientras que el método estático con 21 MPa de presión se considera demasiado fuerte (S), produciendo densidades muy altas en comparación con la densidad target. La versatilidad y comodidad del método giratorio, sumado a su adecuada simulación de la compactación de campo, lo convierten en el método recomendado para mezclas CIR.

3.3. Comportamiento mecánico elástico no lineal y su evolución durante el período de curado

La Figura 10 representa la evolución del Mr obtenido de los ensayos DTx, desde 0 hasta 60 días de curado, de mezclas CIR diseñadas de acuerdo con el PG-4 del 2017, con CB desde 1,50% hasta 3,00%. En Orosa et al.^(XXIV, XXXII) pueden verse más detalles de los valores de Mr alcanzados para estas y otras mezclas CIR.

A 0 días, cuando el ligante todavía no aporta su papel cohesivo, las mezclas resisten principalmente debido a su esqueleto mineral, mostrando resultados de Mr similares en todos los casos; ahora bien, a medida que el curado avanza, los resultados comienzan a presentar evoluciones diferentes. En general, las mezclas con mayor CB mostraron valores de Mr mayores; y con respecto al CA, se observó que las mezclas CIR con CA demasiado bajo no alcanzaban valores tan altos de Mr tras 30 o 60 días, incluso llegando a reducir dichos valores. Considerando la evolución a corto plazo, se concluyó que la mezcla con 2,50% de CB fue la que mostró mejor comportamiento. Se pudo comprobar que, efectivamente, el incremento de Mr experimentado estuvo íntimamente relacionado con su pérdida de agua a lo largo del curado^(XXXII).

Los resultados de los ensayos MTx permitieron obtener los pares tensionales σ_3 , $\sigma_{1,f}$, para las σ_3 consideradas, haciendo posible trazar los círculos de Mohr-Coulomb (según se indica en la Figura 3) y obtener los

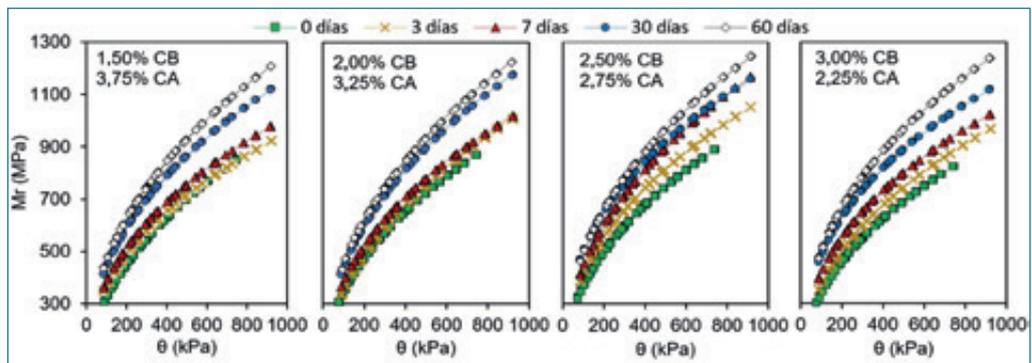


Figura 10. Representación del modelo de Hicks de mezclas CIR diseñadas de acuerdo al PG-4 a 0 días, 3 días, 7 días, 30 días y 60 días de curado.

parámetros cohesión (C) y ángulo de fricción interna (φ). La Figura 11 muestra las líneas de fallo de la mezcla CIR con 2,50% de CB a distintas edades de curado, así como un resumen de los parámetros de cortante de las mezclas estudiadas, en condiciones sin curar y totalmente curadas.

Se puede observar como ya a 0 días de curado, a pesar de que el ligante no ejerce todo su papel de unión, en todos los casos el material presenta cierto nivel de cohesión debido a la compactación. A esta edad de curado, contenidos crecientes de ligante aumentaron ligeramente la cohesión, pero disminuyeron también el ángulo de fricción interna, debido al efecto lubricante entre los áridos. Mientras que a edades tempranas el material resiste principalmente por fricción interna, gracias a su esqueleto mineral, tras el curado podemos ver cómo aumentan significativamente las cohesiones en todos los casos, reduciéndose al mismo tiempo el ángulo de fricción interna. Al igual que ocurría con la evolución de los Mr, los mayores incrementos de cohesión ocurren durante los primeros 7 días.

Los ensayos RLPDx se realizaron con una PCC de $\sigma_3 = 50$ kPa; y los σ_d cíclicos se derivaron de los resultados de la MTx, haciendo posible realizar los RLPDTx a SR desde el 20% al 80%. Como ejemplo, la Figura 13a muestra las deformaciones permanentes acumuladas (ϵ_p) de la mezcla CIR curada con 2,50% de CB a diferentes SR frente al número de ciclos de carga (N). Además, las tasas de deformación permanente acumulada (ϵ_p / N) también se trazaron frente

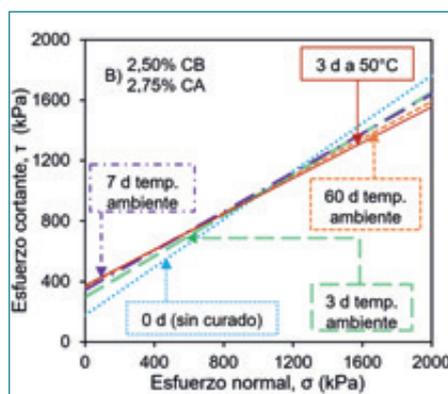


Figura 11. Parámetros a cortante de mezclas CIR en distintas etapas del curado.

		Mezclas CIR		C (kPa)	φ (°)
A)	2,00% CB	Curada		364,82	42,70
	3,25% CA	Sin curar		167,07	40,24
B)	2,50% CB	Curada		373,60	30,60
	2,75% CA	Sin curar		176,93	38,38
C)	3,00% CB	Curada		426,52	27,05
	2,25% CA	Sin curar		187,23	36,58

a la deformación permanente acumulada (ϵ_p), para analizar el grado de estabilización de la deformación (Figura 13b).

Las figuras 13a y 13b combinadas permitieron definir el SR crítico para cada mezcla CIR (Figura 13c), siendo este el valor límite de SR a partir del cual la deformación permanente alcanza la etapa terciaria de deformación según la teoría del límite Shakedown (Figura 4), y la deformación permanente muestra un incremento acelerado con el número de ciclos, no se estabiliza y se produce el fallo. Para cada una de las mezclas estudiadas, la tabla de la Figura 13c indica los SR críticos, así como la presión de confinamiento, tensiones principal y desviadora de fallo y tensión aplicada a partir de la cual se produjo fluencia antes de los 90.000 ciclos. Cuando existen niveles de tensión por encima de la SR crítica en el material CIR, se considera que se produce formación de roderas de la sección del pavimento y, por lo tanto, el fallo. Todas las probetas tuvieron unas propiedades volumétricas similares, por lo que las diferencias en los resultados se debieron principalmente a los CB. Un mayor CB proporciona una mayor flexibilidad mientras que empeora el comportamiento ante la deformación permanente. Por otro lado, un CB bajo proporciona una mayor fricción interna, pero también ocasiona aparición de fluencia más temprana en casos de alto SR. Por ello, la mezcla CIR con 2,50% de CB resultó ser la mejor en términos de respuesta a la deformación permanente, mostrando además los mejores resultados en términos de módulo resiliente y evolución con el tiempo de curado a corto plazo.

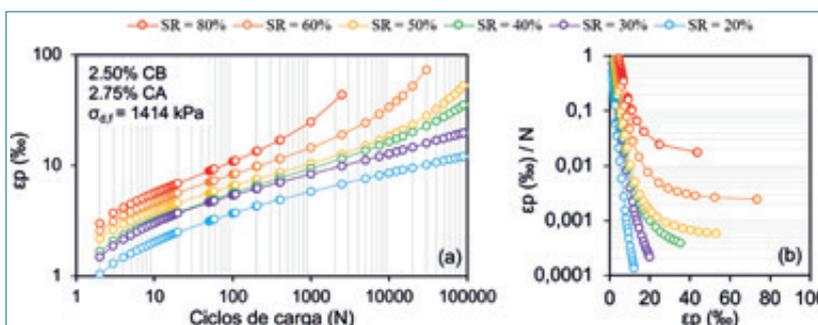
3.4. Simulación numérica de secciones de firme rehabilitadas

Como ejemplo de los resultados obtenidos, la Figura 14a muestra la variación del Mr con la profundidad en una base de CIR de 80 mm de espesor, a distintos tiempos de curado; mientras que la Figura 14b muestra las diferencias en el Mr a distintas profundidades para distintos espesores de base de CIR (a 7 días de curado).

También se compararon escenarios con y sin capa de rodadura HMA sobre el CIR. El curado del CIR produjo un aumento de Mr, mientras que la presencia de la capa de rodadura de HMA disminuyó el estado tensional de la base de CIR, reduciendo, en consecuencia, los valores de Mr, así como su variación con la profundidad, y mostrando valores más estables. Sin embargo, los diferentes tipos de subbase mostraron distintas tendencias en cuanto a la variación de Mr con diferentes



Figura 12. Probetas tras ser sometidas a ensayos MTX. Inclínación del ángulo de rotura aproximadamente 60°.



Mezclas CIR	σ_3 (kPa)	$\sigma_{1,fallo}$ (kPa)	$\sigma_{d,fallo}$ (kPa)	SR crítico (%)	$\sigma_{d,aplicado}$ (kPa)
2,00% CB - 3,25% CA	50	1927	1877	30	563
2,50% CB - 2,75% CA	50	1464	1414	30	424
3,00% CB - 2,25% CA	50	1527	1477	20	295

Figura 13. Resultados de los ensayos RLPDTx de la mezcla con 2.50% de CB curada, a diferentes stress ratios: (a) deformación permanente acumulada frente a número de ciclos de carga, (b) tasa de deformación permanente acumulada frente a la deformación permanente acumulada, y (c) esfuerzos principales de fallo, desviadores aplicados y stress ratio críticos para las distintas mezclas CIR.

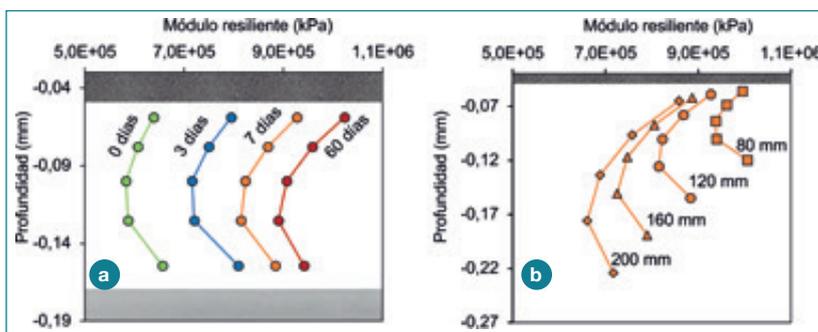


Figura 14. Predicción del Mr a distintas profundidades (a) a distintas edades de curado del material CIR con espesor de 80 mm, y (b) para distintos espesores de base de material CIR a 7 días de curado.

espesores de la base CIR, como se muestra en las figuras 15a y 15b. En estas figuras se ofrecen las variaciones de SR máximo en el material CIR en función de su espesor, el tipo de subbase (UGM para zahorra y CTM para suelocemento), y existencia o no de capa de rodadura HMA. Si consideramos un SR límite del 40%, avalado por la

literatura, podemos ver una respuesta tensional adecuada con subbase de suelocemento, mientras que, en caso de zahorra, las tensiones en el material CIR son más variables con el espesor, requiriendo mayor espesor y tiempo de curado para no presentar stress ratios excesivos. En cuanto a la disminución de los SR máximos, la Figura 15 muestra cómo la disminución tras 7 días es comparable a la obtenida tras 60 días de curado, por lo que 7 días podrían considerarse un tiempo suficiente de curado del CIR, y adecuado para la extensión de la capa de rodadura de HMA. Más información sobre los resultados obtenidos en este estudio numérico pueden consultarse en Orosa et al.^(xxx).

4. Conclusiones

- La tendencia actual en el sector de la construcción, especialmente en carreteras, se orienta hacia técnicas más sostenibles, respetuosas con el medio ambiente y en línea con la economía circular. Las mezclas bituminosas recicladas en frío con emulsión bituminosa, especialmente su aplicación *in situ* (CIR), son una

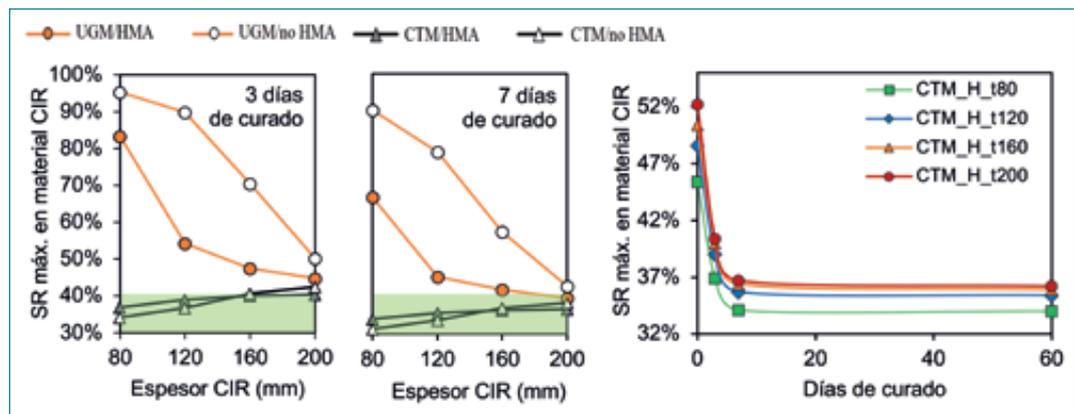


Figura 15. Stress ratio máximos para distintos espesores de la base de material CIR tras (a) 3 días de curado y (b) 7 días de curado, y variación del stress ratio máximo con el curado considerando distintos espesores de CIR.

opción prometedora que está tratando de ser más desarrollada y adoptada.

- En el diseño en laboratorio de las mezclas CIR, la elección de un método de compactación que simule las propiedades volumétricas en campo es fundamental. Se determinó que la compactación giratoria es la más adecuada y versátil. Los requisitos de resistencia mínima deben ajustarse al nivel de compactación especificado.
- La granulometría del RAP es crucial para el encaje inicial entre partículas y las propiedades volumétricas de las mezclas CIR. No se garantiza que una energía de compactación específica siempre produzca las mismas propiedades volumétricas.

- Las mezclas CIR exhiben un comportamiento mecánico viscoelástico, pero también dependen en gran medida del nivel de tensión al que se someten, especialmente en las etapas iniciales tras su fabricación. Se considera que los ensayos triaxiales son una herramienta muy adecuada para caracterizar completamente este material. Si bien los ensayos simples, como el ITS, son útiles para un diseño preliminar, se recomienda una caracterización más detallada mediante ensayos triaxiales con distintos niveles de confinamiento.
- Las simulaciones numéricas se han demostrado como una herramienta poderosa para respaldar el diseño, permitiendo la implementación de modelos de comportamiento no lineales, evaluación de la evolución con el curado y el espesor de reciclado en la respuesta seccional del pavimento.
- En cuanto a la aplicación de los resultados en los métodos de diseño, particularmente en el PG-4 del 2017, se recomienda ajustar los requerimientos de resistencia mínima para adaptarlos a un material CIR y a su nivel de compactación. Además, se propone investigar la inclusión de las características del material de las capas inferiores en el diseño.

La presente investigación ha demostrado que las mezclas bituminosas recicladas en frío son una alternativa prometedora y sostenible para la rehabilitación de carreteras. Los resultados han contribuido al avance en el conocimiento de las mezclas bituminosas recicladas en frío, proporcionando recomendaciones prácticas y sugiriendo áreas de investigación que pueden impulsar aún más su desarrollo y aplicación en la industria de la construcción y rehabilitación de carreteras.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento por la financiación proporcionada por el proyecto BIA2016-80317-R/AEI/10.13039/501100011033 del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España, así como por la beca predoctoral asociada para la Formación de Personal Investigador (FPI) BES-2017-079633. Se agradece especialmente a la Universidade da Coruña por su apoyo a través de la Beca INDITEX 2020, así como por la financiación del acceso abierto de los artículos publicados sobre esta investigación en Elsevier. Los autores también desean expresar su sincero agradecimiento a ARIAS INFRAESTRUCTURAS, CEPESA y ECOASFALT por su generosa donación de materiales para esta investigación. Por último, el autor principal desea destacar y agradecer el apoyo incondicional de Natalia Pérez Barge y Jorge del Valle Corte durante los trabajos de laboratorio.

Referencias bibliográficas

- I. Müller, M., T. Kric, & Blohmke, J. Putting the Construction Sector at the Core of the Climate Change Debate. Deloitte, 2021.
- II. United Nations. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. New York, NY, USA, 2015.
- III. Bardesi, A. & Soto, J.A. Mezclas bituminosas a baja temperatura: Mezclas en frío, templadas y semicalientes. Revista Carreteras, Vol. No 169, 2010.
- IV. Jain, S. & Singh, B. Cold Mix Asphalt: An Overview. Journal of Cleaner Production, Vol. 280, 2021, p. 124378. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124378>
- V. Offenbacher, D., Saidi, A., Ali, A., Mehta, Y., Decarlo, C.J. & Lein, W. Economic and Environmental Cost Analysis of Cold In-Place Recycling. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 33, No. 3, 2021, p. 04020496. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003610](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003610)
- VI. Gómez-Meijide, B. & Pérez Pérez, I. Propiedades de las mezclas bituminosas en frío con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición. Revista Carreteras, Vol. no 214, 2017.
- VII. Pérez, I., Medina, L. & Del Val, M.A. Nonlinear Elasto-Plastic Performance Prediction of Materials Stabilized with Bitumen Emulsion in Rural Road Pavements. Advances in Engineering Software, Vol. 91, 2016, pp. 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.10.009>
- VIII. Orosa, P., Pasandín, A. R. & Pérez, I. Compaction and Volumetric Analysis of Cold In-Place Recycled Asphalt Mixtures Prepared Using Gyratory, Static, and Impact Procedures. Construction and Building Materials, Vol. 296, No. 123620, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123620>
- IX. Wirtgen GmbH. Wirtgen Cold Recycling Technology. Wirtgen Cold Recycling Technology, 2012, p. 367.
- X. Asphalt Recycling & Reclaiming Association (ARRA). Basic Asphalt Recycling Manual. Annapolis, 2001.
- XI. Ministerio de Fomento. PG-4. Orden Circular 40/2017 sobre Reciclado de Firmes y Pavimentos Bituminosos (2017).
- XII. Orosa, P. Mechanical Behaviour of Cold In-Place Recycled Asphalt Mixtures with Bitumen Emulsion. Effect of Curing Time on the Response of Rehabilitated Pavement Sections. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña, 2022. <http://hdl.handle.net/2183/30989>
- XIII. Piratheepan, M. Designing Cold Mix Asphalt (CMA) and Cold-In-Place Recycling (CIR) Using SUPERPAVE Gyratory Compactor. Tesis de Master, University of Nevada, Reno (2011).
- XIV. Ministerio de Fomento. PG-4. Orden Circular 8/2001 sobre reciclado de firmes (2001).

- XV. Orosa, P., Pasandín, A. R. & Pérez, I. Assessment of Two Laboratory Design Methods for CIR Mixtures with Bitumen Emulsion Based on Static and Gyrotory Compaction. *Construction and Building Materials*, Vol. 265, 2020, p. 120667. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120667>
- XVI. Filho, W. U., Gutiérrez Klinsky, L. M., Motta, R. & Bariani Bernucci, L. L. Cold Recycled Asphalt Mixture Using 100% RAP with Emulsified Asphalt-Recycling Agent as a New Pavement Base Course. *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2020, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/5863458>
- XVII. Jin, D., Ge, D., Chen, S., Che, T., Liu, H., Malburg, L. & You, Z. Cold In-Place Recycling Asphalt Mixtures: Laboratory Performance and Preliminary m-e Design Analysis. *Materials*, Vol. 14, No. 8, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14082036>
- XVIII. Orosa, P., Orozco, G., Carret, J. C., Carter, A., Pérez, I. & Pasandín, A. R. Compactability and Mechanical Properties of Cold Recycled Mixes Prepared with Different Nominal Maximum Sizes of RAP. *Construction and Building Materials*, Vol. 339, No. 127689, 2022. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127689>
- XIX. Ebels, L.-J. Characterisation of Material Properties and Behaviour of Cold Bituminous Mixtures for Road Pavements. Tesis Doctoral. Stellenbosch University, 2008.
- XX. Casillas, S & Braham, A. Quantifying Effects of Laboratory Curing Conditions on Workability, Compactability, and Cohesion Gain of Cold in-Place Recycling. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 22, No. 10, 2021, pp. 2329–2351. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1753101>
- XXI. Jenkins, K. J. & Collings, D. C. Mix Design of Bitumen-Stabilised Materials – South Africa and Abroad. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 18, No. 2, 2017, pp. 331–349. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1213511>
- XXII. Santagata, E., Chiappinelli, G., Riviera, P. P. & Baglieri, O. Triaxial Testing for the Short Term Evaluation of Cold-Recycled Bituminous Mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 11, No. 1, 2010, pp. 123–147. <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690263>
- XXIII. Asphalt Academy. Technical Guideline (TG2). Bitumen Stabilised Materials Southern African Bitumen Association (Sabita). South Africa, 2020.
- XXIV. Orosa, P., Pérez, I. & Pasandín, A. R. Short-Term Resilient Behaviour and Its Evolution with Curing in Cold in-Place Recycled Asphalt Mixtures. *Construction and Building Materials*, Vol. 323, 2022, p. 126559. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126559>
- XXV. Orosa, P., Pérez, I., Pasandín, A. R. & Haddock, J. E. A Stress-Temperature Superposition Approach to Study the Nonlinear Resilient Behavior of Cold Recycled Mixtures (CRM) with Active Filler Addition. *Construction and Building Materials*, Vol. 384, No. April, 2023, p. 131439. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131439>
- XXVI. Hicks, R. G. Factors Influencing the Resilient Response of Granular Materials. Tesis Doctoral. University of California, Berkeley, 1970.
- XXVII. Uzan, J., Witczak, M. W., Scullion, T. & Lytton, R.L. Development and Validation of Realistic Pavement Response Models. *International Conference on Asphalt*, 1992.
- XXVIII. NCHRP (National Cooperative Highway Research Program). Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Part 2. Design Inputs, Final Report NCHRP 1–37A. 2004.
- XXIX. Orosa, P., Pérez, I. & Pasandín, A. R. Evaluation of the Shear and Permanent Deformation Properties of Cold In-Place Recycled Mixtures with Bitumen Emulsion Using Triaxial Tests. *Construction and Building Materials*, Vol. 328, 2022, p. 127054. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127054>
- XXX. Pérez, I., Medina, L., Gómez-Mejjide, B., Costa, P. A. & Cardoso, A. S. Numerical Simulation of Bitumen Emulsion-Stabilised Base Course Mixtures with C&D Waste Aggregates Considering Nonlinear Elastic Behaviour. *Construction and Building Materials*, Vol. 249, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118696>
- XXXI. Orosa, P., Medina, L., Fernández-Ruiz, J., Pérez, I. & Pasandín, A. R. Numerical Simulation of the Stiffness Evolution with Curing of Pavement Sections Rehabilitated Using Cold In-Place Recycling Technology. *Construction and Building Materials*, Vol. 335, No. 127487, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127487>
- XXXII. Orosa, P., Pérez, I. & Pasandín, A. R. Pasandín. Evaluation of Water Loss and Stiffness Increase in Cold Recycled Mixes during Curing. *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 18, 2023, p. e01877. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2023.E01877> ■



acceso
al trabajo
completo