

JUAN ANTONIO FERNÁNDEZ DEL CAMPO

**Premio internacional
A LA INNOVACIÓN EN CARRETERAS**

Texto completo

**Mezclas bituminosas recicladas en frío con emulsión:
Sostenibilidad y Circularidad en el sector de la
pavimentación.**

Autores:

Pablo Orosa. Doctor en Ingeniería Civil (Universidade da Coruña).

Ignacio Pérez. Profesor Titular (Universidade da Coruña).

Ana María Rodríguez. Profesora Titular (Universidade da Coruña).

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	1
RESUMEN.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
▪ Antecedentes y motivación.....	3
Clasificación de las técnicas de reciclado de pavimentos asfálticos	5
Beneficios y actuales limitaciones de las mezclas bituminosas recicladas en frío.....	6
▪ Objetivos de la investigación	8
ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	9
1. Métodos de diseño de mezclas bituminosas recicladas en frío (CRM). Influencia de los métodos de compactación y caracterización mecánica. Caso del PG-4 español.....	9
Materiales y métodos	10
Resultados y discusión.....	12
Conclusiones y recomendaciones	14
2. Propiedades volumétricas de mezclas bituminosas recicladas en frío según distintos métodos de compactación. Un estudio de la compactación giratoria	14
Materiales y métodos	15
Resultados y discusión.....	17
Conclusiones principales	19
3. Efecto de las características del RAP en las propiedades volumétricas y mecánicas de las mezclas bituminosas recicladas en frío	19
Materiales y métodos	20
Resultados y discusión.....	21
Conclusiones principales	25
4. Comportamiento mecánico no lineal de mezclas bituminosas recicladas en frío y su evolución con el tiempo de curado	25
Materiales y métodos	27
Resultados	32
Conclusiones principales	37
5. Simulación numérica de secciones de firme rehabilitadas mediante reciclado en frío in situ con emulsión.....	38
Secciones de firme y materiales	38
Resultados	40
Conclusiones principales	44
CONCLUSIONES GENERALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	44
AGRADECIMIENTOS	46
REFERENCIAS.....	46
DIVULGACIÓN DE RESULTADOS, RECONOCIMIENTOS Y DISTINCIONES.....	49

RESUMEN

Dentro del sector de la carretera, el constante incremento del precio del asfalto tras la crisis del petróleo y la escasez de recursos naturales, ha llevado a que en los últimos años existiese un interés por el desarrollo de técnicas de pavimentación más eficientes, como las técnicas de reciclado de pavimentos. Por otro lado, la preocupación sociopolítica actual por un cambio de paradigma en los modelos de crecimiento y desarrollo hacia alternativas más sostenibles y circulares, ha fomentado el impulso de tecnologías a baja temperatura, asociadas con reducciones de las emisiones de gases de efecto invernadero. Una de las técnicas más prometedoras es el reciclado en frío in-situ con emulsión bituminosa (o cold in-place recycling—CIR) debido a sus ventajas de eficiencia en el uso de materiales y energía, reducción de emisiones y generación de residuos, y, en general, por su sostenibilidad y circularidad, permitiendo la reutilización del material fresado de carreteras desgastadas (conocido como Reclaimed Asphalt Pavement—RAP) en nuevas mezclas asfálticas, realizando la totalidad del proceso a temperatura ambiente. El CIR es una técnica bastante nueva, y todavía no se han llegado a desarrollar un método de diseño ni de caracterización internacionalmente aceptados para las mezclas recicladas en frío (o cold recycled mixtures—CRM). Entre otros factores, esto se debe a la heterogeneidad del RAP y al comportamiento complejo que presentan las CRM, las cuales necesitan un cierto tiempo de curado para desarrollar sus resistencias mecánicas.

En este trabajo de investigación se han caracterizado y estudiado el comportamiento de CRM preparadas con 100% de RAP y emulsión bituminosa, simulando el material estabilizado tras un CIR. En primer lugar, se analizaron la compactabilidad y las resistencias empleando procedimientos habitualmente usados en los métodos de diseño, con mayor atención en el método actualmente vigente en España. Se analizó la influencia de las características del RAP en las propiedades volumétricas y mecánicas, comprobando el comportamiento viscoelástico de las CRMs y la elevada influencia del volumen de huecos de aire en su respuesta mecánica.

El comportamiento no lineal, dependiente del nivel tensional, que presentan las CRMs motivó la realización de un extenso estudio mediante ensayos triaxiales. Se investigó el desarrollo de la rigidez durante el período de curado, tanto a corto como a largo plazo, mediante ensayos triaxiales dinámicos de módulo resiliente. Ensayos triaxiales monotónicos permitieron conocer los parámetros a cortante y las tensiones de fallo ante distintos estados de confinamiento; con las que, posteriormente, empleando ensayos triaxiales de carga repetida, se estudió la respuesta a la deformación permanente a largo plazo.

Finalmente, se ajustaron modelos de comportamiento predictivos de este material y se implementaron en un software de simulación numérica que permitió predecir la respuesta de secciones rehabilitadas con CIR. Las simulaciones mostraron que tras 7 días de curado el CRM desarrolla una rigidez representativa de su rigidez a largo plazo, y que su comportamiento es más adecuado y estable con subbase semirrígida, mientras que presenta tensiones mucho más elevadas en presencia de subbase flexible.

INTRODUCCIÓN

▪ Antecedentes y motivación

El calentamiento global es uno de los retos principales con los que la humanidad debe enfrentarse a día de hoy. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son una de las causas principales de este problema, y su tendencia a lo largo de las últimas décadas ha sido creciente (Figura 1). A pesar del descenso registrado en 2009, asociado a la recesión económica mundial y el auge del empleo de energías renovables; tras la recuperación económica las emisiones de GEI recuperaron su tendencia creciente, siendo el sector de la construcción el responsable de cerca del 40% de las GEI totales. A día de hoy, a medio plazo tras la pandemia mundial, se espera que el sector continúe creciendo, y con él el consumo de recursos naturales, contaminación y la generación de residuos, a menos que se tomen medidas reales (Müller et al., 2021).

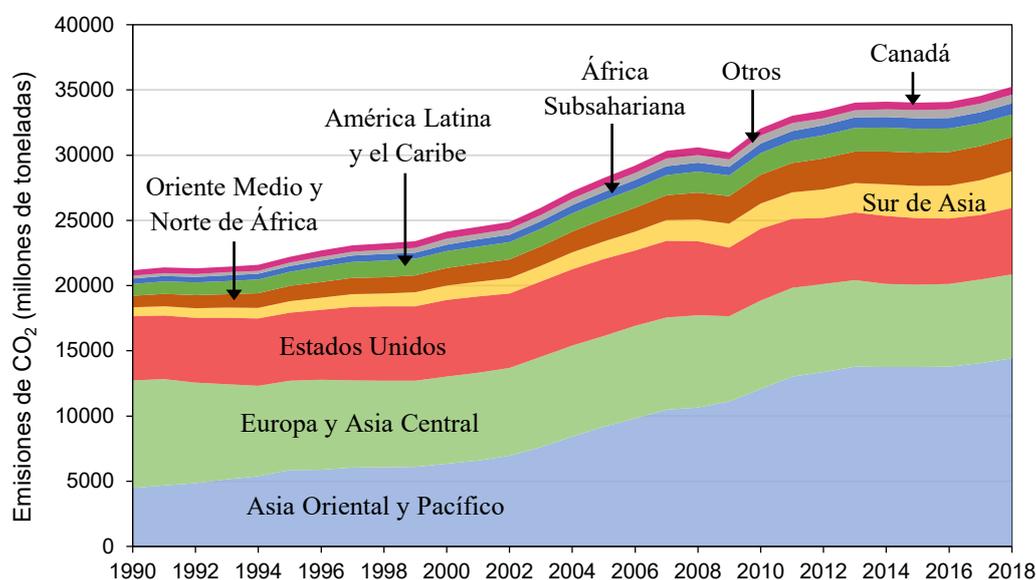


Figura 1 – Emisiones mundiales de CO₂ por regiones. Fuente: EPA (US Environmental Protection Agency) & WRI (World Resources Institute), 2021

Tras conocidos acuerdos internacionales contra el cambio climático, como el Protocolo de Kioto (1997) o el Acuerdo de París (2015), la Comisión Europea publicó recientemente dos documentos (European Commission, 2019a, 2019b) que establecen ciertos objetivos ambiciosos de sostenibilidad y economía circular para cumplir en los años 2030 y 2050 (United Nations, 2015). El cumplimiento de tales objetivos implica reducciones de consumo y huella de carbono, garantizando eficiencia energética y de recursos, duplicando la tasa de empleo de materiales circulares. Se busca un cambio de paradigma hacia un modelo de crecimiento regenerativo y circular, promoviendo el empleo de materiales reciclados y gestionando el consumo de nuevos recursos dentro de límites sostenibles.

Dentro del sector de la carretera, se sabe que en Europa más del 90% de las carreteras se pavimentan con mezclas asfálticas, tratándose del material preferido por su comodidad y seguridad para los usuarios; su rentabilidad, rapidez y flexibilidad en la ejecución; y su exitosa combinación de rendimiento, mantenimiento y durabilidad. En la actualidad, el tipo de mezcla más utilizado es la mezcla asfáltica en

caliente tradicional (AC o HMA), que debe calentarse a temperaturas muy elevadas (hasta 190 °C) por requisitos de los ligantes bituminosos, produciendo una cantidad importante de emisiones de GEI. Esto ha promovido el desarrollo de otras tecnologías que permiten reducir la viscosidad de los ligantes sin aumentar tanto las temperaturas, como es el caso de la mezcla asfáltica semi caliente (WMA) o la mezcla asfáltica templada (HWMA), con temperaturas necesarias de 100–140 °C, o inferiores a 100 °C, respectivamente. Finalmente, se encuentra la mezcla asfáltica en frío (CMA), la cual no necesita calentamiento y todo el proceso de producción puede realizarse a temperatura ambiente (0–40 °C), empleando ligantes bituminosos en forma de emulsiones o espumas, y agua para facilitar los procesos de mezclado y compactación. Esta baja temperatura de trabajo de la CMA hace que sus ventajas medioambientales y de ahorro de energía sean significativamente superiores al resto de tecnologías (Jain & Singh, 2021; Offenbacher et al., 2021; Xiao et al., 2018). En la Figura 2 se aprecia como las tecnologías de producción de HWMA y WMA reducen el total de emisiones de GEI con respecto a las HMA, pero sin duda las mayores reducciones son resultado del empleo de CMA.

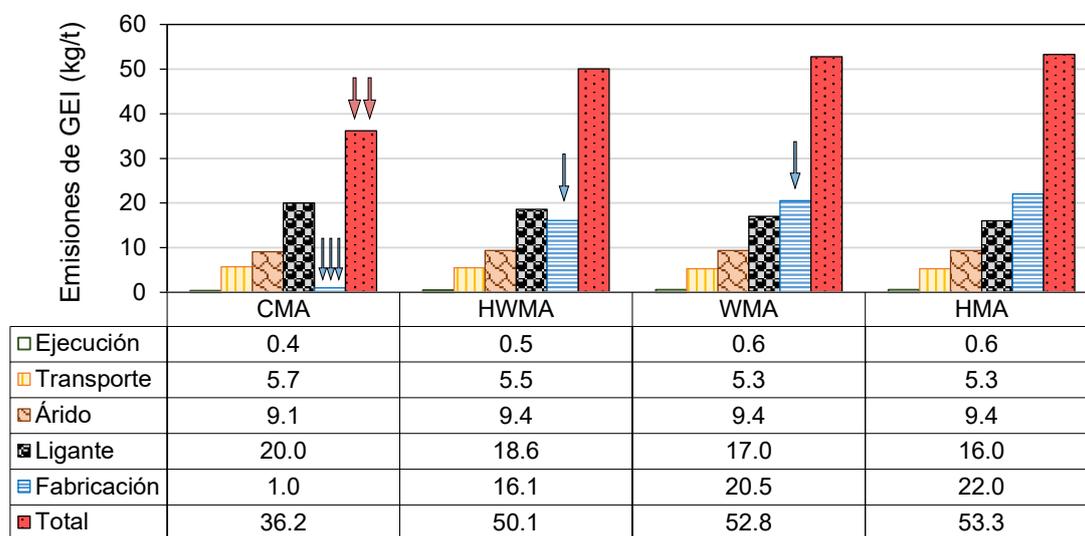


Figura 2 – Emisiones totales de gases de efecto invernadero procedentes de los distintos elementos de la utilización de técnicas de pavimentación asfáltica a diferentes temperaturas. Fuente: Jain & Singh (2021) y Van De Ven et al. (2007)

Las diferentes solicitaciones a las que se ve sometida una carretera a lo largo de su vía útil, tanto debidas al tráfico como a los agentes atmosféricos, sumadas al envejecimiento del ligante con el tiempo, endureciéndose y volviéndose frágil, hacen que las mezclas asfálticas sean susceptibles de sufrir daños y así reducir el nivel de servicio con el que la carretera fue diseñada. Es por ello que, desde el proyecto de la carretera, debe considerarse la necesidad de operaciones periódicas de mantenimiento para garantizar el nivel de servicio adecuado, evaluando periódicamente el estado del pavimento y, cuando sea necesario, realizar trabajos de mantenimiento como limpieza, sellado de grietas o bacheos. Sin embargo, cuando el deterioro del pavimento es mayor, se requieren trabajos de rehabilitación más costosos, o incluso puede ser necesaria la reconstrucción total al final de la vida útil del pavimento. La Figura 3 muestra la típica curva de deterioro del nivel de servicio a lo largo de la vida útil del pavimento, donde se ilustran los escenarios descritos. Labores de mantenimiento preventivo o rehabilitaciones, realizadas a tiempo, pueden alargar considerablemente la vida de nuestras carreteras, pudiendo atrasar significativamente la necesidad de reconstrucciones de elevado coste.

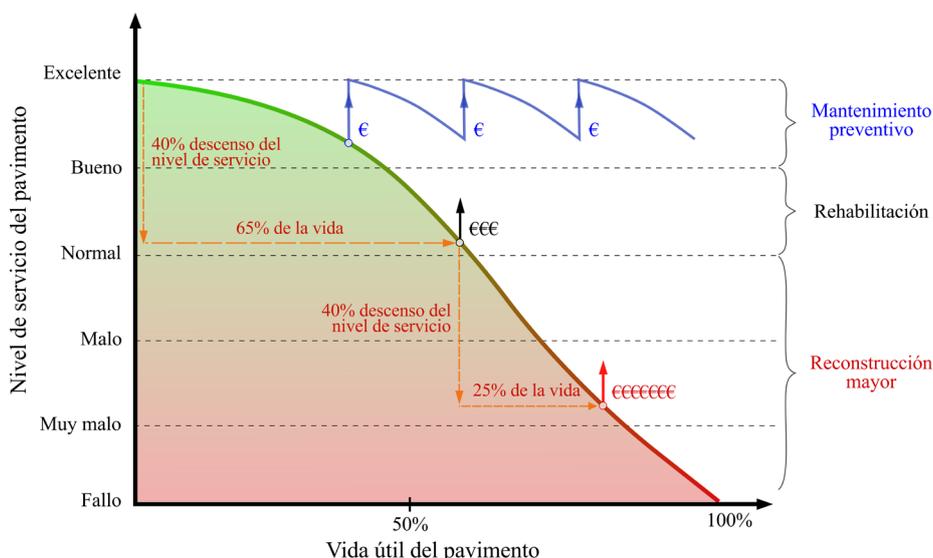


Figura 3 – Diagrama de la pérdida de calidad de un pavimento durante su vida útil (Orosa ,2022)

En la década de los 70, en plena crisis del petróleo y en medio de numerosos movimientos ecologistas, comenzó una preocupación por el desarrollo y mejora de técnicas de pavimentación más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente; y además de las técnicas a baja temperatura, se promovió el estudio y desarrollo de las conocidas técnicas de reciclado de pavimentos asfáltico. Se llevaron a cabo numerosas investigaciones sobre mezclas asfálticas recicladas, en las que se buscó incorporar RAP u otros materiales reciclados, sustituyendo total o parcialmente a los áridos naturales de las mezclas. Según datos de la EAPA (European Asphalt Pavement Association), en 2020 se registró la generación de unos 50 millones de toneladas de RAP en Europa, de los cuales el 76% se reutilizó en la fabricación de nuevas mezclas asfálticas y un 20% como material granular en capas de firme (EAPA, 2020); y según datos de la NAPA (National Asphalt Pavement Association), en EEUU se generaron cerca de 90 millones de toneladas de RAP, de las cuales el 94% fueron empleadas en nuevas mezclas bituminosas (Williams et al., 2019), tratándose en ambos casos de cifras realmente prometedoras, y todo ello es gracias a que el asfalto es un material totalmente reciclable, o incluso reutilizable (European Asphalt Pavement Association, 2014).

Clasificación de las técnicas de reciclado de pavimentos asfálticos

Una clasificación habitual de las técnicas de reciclado de pavimentos asfálticos es en función de la temperatura a la que se realizan; distinguiendo así el reciclado en caliente, cuando se aplica alguna fuente de calor, y el reciclado en frío, cuando el proceso se realiza a temperatura ambiente. En ambos casos es posible producir las mezclas recicladas tanto en planta como *in situ*.

El reciclado en frío o *cold recycling* (CR) representa, por tanto, una potente y prometedora técnica que combina las dos características comentadas durante esta sección. En primer lugar, no es necesario el calentamiento para su ejecución, pudiendo realizarse todo el proceso de pavimentación a temperatura ambiente. Además, esta técnica permite la incorporación de RAP como fase sólida de las mezclas recicladas en frío (o *cold recycled mixtures*, CRM), evitando el empleo de nuevos áridos naturales.

Cuando todas las operaciones se realizan *in situ*, utilizando recicladoras especialmente diseñadas para ello (Figura 4a), la técnica se conoce como Reciclado en Frío In Situ o *Cold In-Place Recycling (CIR)*, mientras que si los materiales recuperados se transportan a plantas de tratamiento para su uso posterior, la técnica se conoce como Reciclado en Frío en Planta, o *Cold Central Plant Recycling (CCPR)*. Dado que el CCPR permite una mayor precisión, con selección y posible pretratamiento de los materiales fresados recuperados, aumenta el nivel de calidad y fiabilidad del producto final, ofreciendo también la posibilidad de almacenamiento temporal.

Las operaciones principales del CIR se realizan en el interior del tambor de corte (Figura 4b), donde se realizan operaciones de fresado, inyección de ligante bituminoso y agua, y mezclado. Sin embargo, además de la recicladora, se requieren otros equipos como compactadores o motoniveladoras, siendo habitual realizar todas las operaciones en cadena, en forma de “tren de reciclado” (Figura 5).

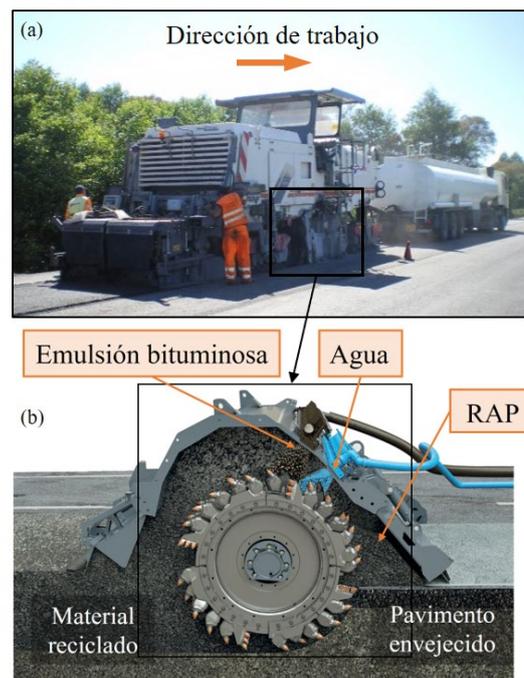


Figura 4 – (a) Recicladora montada sobre neumáticos y (b) Detalle del tambor de corte, con la inyección de agua y emulsión de betún, durante las operaciones de CIR (Orosa, 2022)



Figura 5 – Ejemplo de un tren de CIR (Orosa, 2022)

Beneficios y actuales limitaciones de las mezclas bituminosas recicladas en frío

En los últimos años, el CIR ha sido una de las principales apuestas dentro del sector de la pavimentación como alternativa competente a los métodos convencionales de mantenimiento y rehabilitación de carreteras, por su rentabilidad, durabilidad y sostenibilidad. Los beneficios derivados pueden resumirse y clasificarse de la siguiente manera:

- **Medioambientales:** es posible reutilizar el 100% del material recuperado de las antiguas capas de asfalto (áridos y ligante asfáltico). En consecuencia, se reduce la generación de residuos y acumulación en vertederos, así como la necesidad de utilizar nuevos áridos vírgenes. Se reduce también la necesidad de transporte, siendo esto beneficioso para el medioambiente, y al tratarse de una técnica en frío, no es necesario aplicar calor durante su aplicación, reduciendo el consumo energético y cerca del 90% las emisiones de GEI durante su ejecución (Figura 2).
- **Económicos:** No es necesario utilizar nuevos áridos vírgenes, ahorrando costes de material y transporte. Además, al reutilizar el material fresado, tampoco es necesario su transporte a

vertederos. Se reducen los costes energéticos al no ser necesaria aplicación de calor, y, en comparación con otros métodos, el CIR es una técnica entre un 20% y un 40% más rápida, reduciendo costes asociados a los plazos del proyecto.

- **Estructurales:** El CIR es una técnica muy versátil y adecuada para la mayoría de los deterioros en el pavimento, y puede aplicarse afectando sólo a un carril de circulación, sin alterar el tráfico en el carril adyacente, y adaptándose a la geometría de la carretera existente. La flexibilidad del material CIR hace que presente un comportamiento muy adecuado como material de base, retrasando problemas como la reflexión de grietas.
- **Seguridad:** los operarios están expuestos a una cantidad significativamente menor de emisiones contaminantes, disminuyendo los riesgos para su salud. Además, la cantidad de equipos necesarios y el tiempo de ocupación de los carriles es también menor debido a la simplicidad de esta técnica, lo que permite reanudar el flujo de tráfico en un intervalo de tiempo más corto.

Sin embargo, durante muchos años las mezclas en frío se han considerado inferiores a las mezclas en caliente, lo que ha hecho que no se hayan utilizado tanto como cabría esperar dadas sus numerosas ventajas. Así, una de las principales limitaciones de la técnica CIR es que se ve afectada por las **condiciones climáticas**. Por ello, la humedad, las fuertes lluvias, o incluso las temperaturas muy bajas pueden dificultar o llegar a impedir su realización (Asphalt Recycling & Reclaiming Association, 2016).

Otras limitaciones de las CRM están relacionadas principalmente con su **comportamiento mecánico y su capacidad estructural**. La presencia de agua en las CRM ayuda a mejorar el mezclado, la trabajabilidad y la compactación, pero hace **necesario un tiempo de curado** durante el cual pierden agua por evaporación, repulsión electrostática y presión inducida durante la compactación. La reducción de humedad y otras reacciones que ocurren durante el curado conducen al desarrollo de la rigidez y resistencia de las CRM, entre otras propiedades (Ferrotti et al., 2020; Kim et al., 2011). Sin embargo, el curado no es un proceso trivial y depende de factores como las condiciones ambientales, la humedad de la mezcla, el uso de filler activos o el nivel de drenaje (Graziani et al., 2018).

La necesidad de un tiempo de curado durante el que desarrollan sus propiedades mecánicas, hace que las CRM sean más vulnerables en las primeras fases tras su ejecución. A **corto plazo** poseen una menor capacidad mecánica, por lo que es necesario un cuidado especial con los primeros flujos de tráfico para evitar roderas y otras deformaciones mientras no existe suficiente cohesión y rigidez. La falta de un conocimiento suficiente sobre la evolución de las propiedades mecánicas de las CRM con el curado ha llevado a un uso reducido de esta técnica, a menudo limitado a carreteras con categoría de tráfico pesado medio o bajo, o arcenes (Pérez, Medina, & Del Val, 2016).

Un problema adicional ligado a la presencia de agua en las CRM es la dificultad de compactación, razón por la cual es habitual limitar los espesores de material CIR. Como se muestra en el diagrama del tren de CIR de la Figura 5, varios equipos sucesivos suelen encargarse del proceso de compactación, el cual deberá ser de mayor intensidad cuanto mayor sea el espesor de la capa (Asphalt Academy, 2020). Además, cuando material CIR pierde el agua, el espacio inicialmente ocupado por el agua pasa a ser ocupado por el aire, razón por la cual estas mezclas presentan un mayor contenido de vacíos de aire

en comparación con las mezclas en caliente. Este **alto contenido de huecos** (que suele oscilar entre el 10% y el 15%) es una de las causas de su menor capacidad mecánica en comparación con otras mezclas, y que hace además a las CRM más susceptibles en climas fríos, debido a los daños por humedad y ciclos de hielo-deshielo (Casillas & Braham, 2021).

Por otro lado, la elevada **heterogeneidad del RAP** dificulta la existencia de un método de diseño internacionalmente aceptado para CRM (Raschia, Graziani, et al., 2019); y siendo el RAP el componente principal de las CRM, no es difícil de imaginar que las características de éstas dependerán en gran medida de las propiedades del pavimento fresado preexistente (tipo de árido, cantidad y tipo de ligante, existencia o no de tratamientos superficiales, etc.).

▪ **Objetivos de la investigación**

Como se ha comentado, una parte fundamental y necesaria de la vida de cualquier carretera son las actividades de rehabilitación, y a diferencia de los métodos tradicionales, actualmente se prefieren alternativas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. En este sentido, la tecnología CIR es una de las principales apuestas del sector de la pavimentación en la búsqueda de soluciones más ecológicas, bajas en emisiones y eficientes en el uso de recursos, consistentes con la economía circular. En los últimos años, la tecnología CIR se ha venido utilizando en numerosas ocasiones; sin embargo, debido a las actuales limitaciones y la falta de un suficiente conocimiento, el diseño suele basarse principalmente en experiencia adquirida y diseños conservadores. Existen manuales y guías para la aplicación del CIR (Asphalt Recycling & Reclaiming Association, 2001; Ministerio de Fomento, 2017; Wirtgen GmbH, 2012), pero no son unánimes, y tampoco existe un método compartido a nivel internacional para caracterizar este material.

Por ello, para lograr un aumento en el conocimiento sobre el comportamiento mecánico evolutivo material reciclado en frío con emulsión bituminosa, se inició el Proyecto BIA2016-80317-R titulado "Comportamiento mecánico de las mezclas recicladas en frío "in situ" con emulsión bituminosa y su impacto en el dimensionamiento de firmes: investigación del periodo de maduración", financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad. La ayuda recibida para este proyecto se complementó con una beca para Formación de Personal Investigador (FPI) de la que fue beneficiario el autor de este documento, y que permitió financiarle durante cuatro años para realizar su tesis doctoral, titulada "Mechanical behaviour of cold in-place recycled asphalt mixtures with bitumen emulsion. Effect of curing time on the response of rehabilitated pavement sections", estructurada como compendio de artículos científicos, y defendida el 17 de junio de 2022.

Durante esta tesis doctoral, se abordó el estudio de CRM, similares a las producidas durante un CIR, desde distintos enfoques. En primer lugar, se llevó a cabo un **análisis de métodos de diseño y caracterización** en laboratorio existentes para este material, con mayor énfasis en el método actualmente vigente en España (Ministerio de Fomento, 2017), analizando también el efecto del empleo

de **distintos ensayos de compactación** o de la **variación del RAP** usado en las propiedades volumétricas y mecánicas de las CRM. En segundo lugar, se dedicó un mayor esfuerzo al **estudio del comportamiento mecánico elástico no lineal** (dependiente del nivel tensional) del material CIR, y su **evolución durante el curado**, realizando **ensayos triaxiales**. Finalmente, dichos resultados pudieron emplearse para ajustar **modelos predictivos del comportamiento**, que fueron implementados en el software FLAC3D para realizar **simulaciones numéricas** de comportamiento de secciones de firme rehabilitadas mediante CIR. Con ello se buscó **demostrar el gran potencial de este material como capa de base, para fomentar así el empleo de esta tecnología prometedora**. Para ello, la tesis doctoral se organizó en 7 capítulos principales, y los resultados dieron lugar a 6 artículos científicos Q1 del JCR, como se ilustra en la Figura 6.

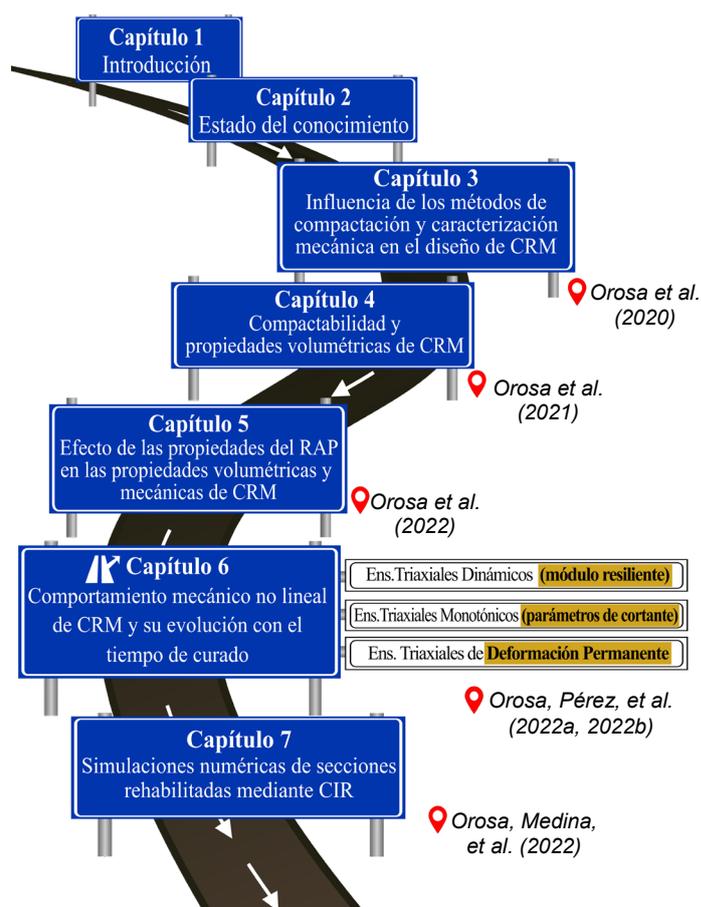


Figura 6 – Organización de la tesis doctoral (Orosa, 2022)

ESTUDIO EXPERIMENTAL

Análogamente con la estructura de la tesis doctoral completa, se decidió organizar este apartado en cinco secciones diferenciadas dentro del estudio.

1. Métodos de diseño de mezclas bituminosas recicladas en frío (CRM). Influencia de los métodos de compactación y caracterización mecánica. Caso del PG-4 español

En la actualidad, existe un amplio abanico de métodos de diseño para CRM, los cuales requieren de distintos métodos de compactación, procedimientos y tiempos de curado, y exigen el cumplimiento de determinados umbrales de resistencia en diferentes ensayos de laboratorio. En España, actualmente está vigente el PG-4 descrito en la Orden Circular 40/2017 – CO40/2017 (Ministerio de Fomento, 2017) para el diseño en laboratorio de los CRM, indicando el uso de un compactador giratorio para la preparación de las mezclas, curado en estufa durante 3 días a 50 °C, y evaluación de la sensibilidad al agua mediante el ensayo de resistencia a la tracción indirecta (ITS). Antes de 2017, sin embargo, estaba en vigor el PG-4 de la Orden Circular 8/2001 – CO8/2001 (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, 2001), el cual, en cambio, indicaba el uso de la compactación estática y establecía requerimientos de resistencia y sensibilidad al agua en el ensayo de Inmersión-Compresión.

Dichos cambios en la metodología eran significativos y se decidió comprobar los efectos en los resultados de ambos métodos de diseño, comparándolos además con métodos de diseño empleados en otros países. Para ello se fabricaron CRM con 100% de RAP según ambos métodos, empleando diferentes proporciones de emulsión bituminosa y de agua, y a partir de los resultados se obtuvieron los valores óptimos que cumpliesen los requerimientos de los respectivos métodos de diseño. En esta sección se busca resumir la metodología y los resultados principales, además de las conclusiones más relevantes del estudio, publicados en Orosa et al. (2020) "Assessment of two laboratory design methods for CIR mixtures with bitumen emulsion based on static and gyratory compaction". *Construction and Building Materials*, 265, 120667.

Materiales y métodos

Todas las CRM se prepararon con el mismo RAP, suministrado por una empresa local. Los resultados de extracción de ligante mostraron un contenido de ligante en el RAP del 7.81%, un índice de penetración de 20.32 dmm y un punto de reblandecimiento de 64.40 °C. Su distribución granulométrica se muestra, junto con los husos de ambas especificaciones, en la Figura 8.

Como ligante se empleó una emulsión bituminosa catiónica con un 60% de contenido de ligante residual, catalogada como C60B5-REC, suministrada por una empresa nacional del sector de la pavimentación.

Para la preparación de las CRM se empleó una mezcladora automática, mezclando en primer lugar la fase sólida con agua durante 60 segundos, y posteriormente se añadió la emulsión bituminosa y se mezcló durante 90 segundos adicionales. Dicho procedimiento se validó mediante ensayos de envuelta, y se empleó durante todos los trabajos de esta investigación.

El contenido de agua añadida (AWC) se obtuvo mediante las Ecuaciones 1 y 2, indicadas en los métodos de diseño de ambos PG-4, buscando mantener constante el contenido óptimo de fluidos (OFC). Dicho OFC es el resultado del ensayo Proctor Modificado, en cada caso, de acuerdo con las especificaciones seguidas, función del contenido de emulsión (EC) o bien del contenido de ligante residual (BC).

$$\text{- Orden Circular 8/2001: } \text{AWC (\%)} = \text{OFC (\%)} - 0.5 - \text{EC (\%)} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\text{- Orden Circular 40/2017: } \text{AWC (\%)} = \text{OFC (\%)} - 0.5 - \text{BC (\%)} \quad \text{Ecuación 2}$$

Durante la compactación estática (SC) se aplicó una presión axial estática de 21 MPa durante 2 minutos tras una precarga de 1 MPa durante 1 minuto, según la OC 8/2001 (Figura 9). Para la compactación giratoria (GC), la OC 40/2017 indica que son necesarios 100 giros de compactación según la granulometría de RAP empleada, con moldes de 100 mm de diámetro, siguiendo el procedimiento de la EN 12697-31 (Figura 10). Además de esta compactación, en este estudio se investigó el efecto de

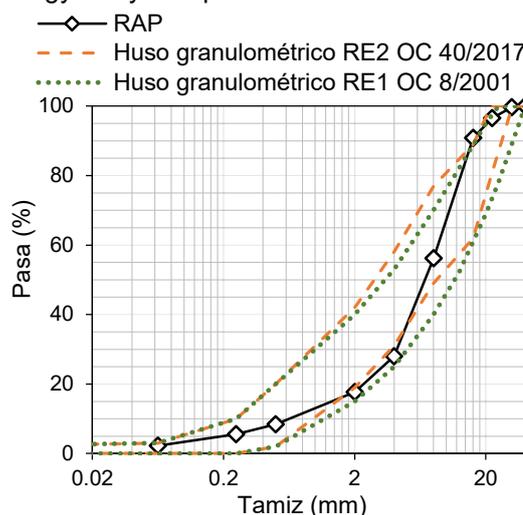


Figura 7 – Distribución granulométrica del RAP y límites según ambos métodos de diseño

aumentar la energía de compactación, empleando 150 y 200 giros. Así, dependiendo de la compactación, la ecuación empleada para el cálculo del agua, y los ensayos de caracterización mecánica empleados, se distinguieron los 6 grupos que se indican en la Tabla 1. En cada grupo se emplearon distintos contenidos de BC y AWC, y en uno de los casos, se añadió un 1% de cemento Portland (PC), de acuerdo con la OC 40/2017.



Figura 9 –
Compactación giratoria

El grupo estático (SG) corresponde a las CRM fabricadas de acuerdo con la OC 8/2001, mientras que el grupo giratorio 1 (GG1) corresponde con las CRM fabricadas de acuerdo con la OC 40/2017. El resto de grupos giratorios (GG2, GG3, GG4, y GG5) son resultado de modificación de compactación, contenido de agua añadida o adición de cemento, respecto al GG1.



Figura 8 –
Compactación estática

Tabla 1 – Mezclas estudiadas según sus componentes y método de compactación, y volumen de huecos de aire

Grupo	Compactación	BC (%)	AWC (%)	PC (%)	V _a (%)
Grupo Estático (SG)	Compactación Estática 21 MPa	1.50	2.75	0.00	8.14
		1.75	2.33	0.00	8.00
		2.00	1.92	0.00	7.42
		2.25	1.50	0.00	7.45
		2.50	1.08	0.00	6.44
Grupo Giratorio 1 (GG1)	Compactación Giratoria 100 giros	2.50	2.75	0.00	14.33
		3.00	2.25	0.00	13.80
		3.50	1.75	0.00	13.32
		4.00	1.25	0.00	12.93
		5.25	0.00	0.00	12.35
Grupo Giratorio 2 (GG2)	Compactación Giratoria 100 giros	1.50	2.75	0.00	15.51
		2.00	1.92	0.00	15.01
		2.50	1.08	0.00	14.58
		3.00	0.25	0.00	12.75
Grupo Giratorio 3 (GG3)	Compactación Giratoria 150 giros	1.50	2.75	0.00	15.81
		2.00	1.92	0.00	14.96
		2.50	1.08	0.00	14.54
		3.00	0.25	0.00	12.59
Grupo Giratorio 4 (GG4)	Compactación Giratoria 200 giros	1.50	2.75	0.00	14.53
		2.00	1.92	0.00	14.42
		2.50	1.08	0.00	13.21
		3.00	0.25	0.00	12.54
Grupo Giratorio 5 (GG5)	Compactación Giratoria 100 giros	1.50	5.00	1.00	15.43
		2.00	4.17	1.00	16.65
		2.50	3.33	1.00	13.97
		3.00	2.50	1.00	13.68

En todos los casos, tras curado en estufa durante 3 días a 50 °C, las CRM preparadas con compactación estática se sometieron a ensayo inmersión-compresión (UCS), ilustrado en la Figura 11a; mientras que las preparadas con el compactador giratorio fueron sometidas a ensayo de sensibilidad al agua según el ensayo de resistencia a la tracción indirecta (ITS), ilustrado en la Figura 11b. En cada caso, se obtuvieron los resultados de los grupos secos (ITS_{dry} e UCS_{dry}) y húmedos (ITS_{wet} y UCS_{wet}), así como las ratios de resistencia conservada (ITSR y TSR, respectivamente), calculadas como:

$$ITSR (\%) = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \cdot 100$$

$$TSR (\%) = \frac{UCS_{wet}}{UCS_{dry}} \cdot 100$$

Resultados y discusión

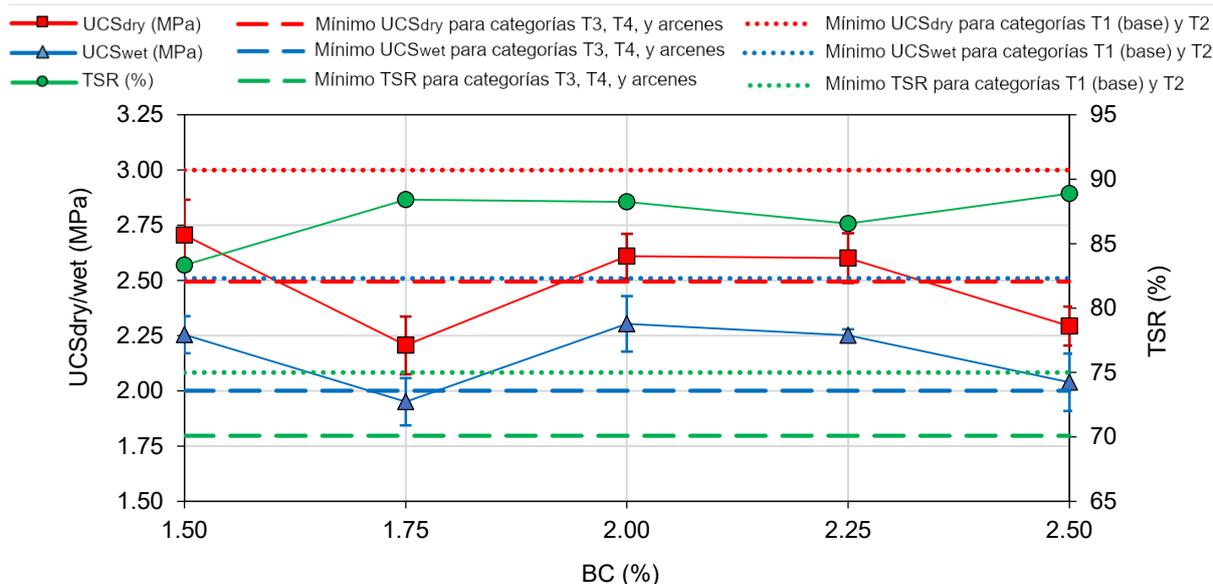


Figura 10 – Resultados de UCS_{dry}, UCS_{wet} y TSR de las CRM del grupo estático

En la Figura 12 se resumen los resultados del ensayo inmersión-compresión correspondientes al grupo estático. Se muestran de forma conjunta los resultados de grupos seco y húmedo (UCS_{dry} y UCS_{wet}), así como ratio de resistencia conservada (TSR) para los distintos contenidos de ligante residual (BC) considerados. Además, se representan los requerimientos indicados en el PG-4 de la OC 8/2001 para las distintas categorías de tráfico pesado mediante líneas horizontales de puntos o de trazos.

Se observó que solamente se cumplieron los requerimientos de UCS_{dry} y UCS_{wet} para las categorías más bajas de tráfico pesado (T3, T4, y arcenes), siendo tal cumplimiento para los contenidos de ligante residual de 1.50%, 2.00%, y 2.25%. En base a los resultados de TSR, se concluyó que el contenido óptimo de BC según este método de diseño fue el 2.00%, correspondiente a un 1.92% AWC.



Figura 11 – Rotura según ensayo inmersión compresión



Figura 12 – Rotura según ensayo ITS

Los resultados de ITS_{dry} e ITS_{wet}, así como la ratio ITS_R, de los grupos giratorios se representan de forma conjunta en los gráficos de la Figura 13, y de nuevo, mediante líneas horizontales, se muestran los requerimientos para las distintas categorías de tráfico pesado indicados el PG-4 de la OC 40/2017. Como se puede observar, los resultados del ITS_R (Figura 13c) son satisfactorios en varios de los casos estudiados, mientras que los resultados del ITS_{dry} y del ITS_{wet} (Figura 13a y 13b, respectivamente) nunca alcanzan los requisitos mínimos del actual PG-4, ni siquiera para las categorías de tráfico más bajas.

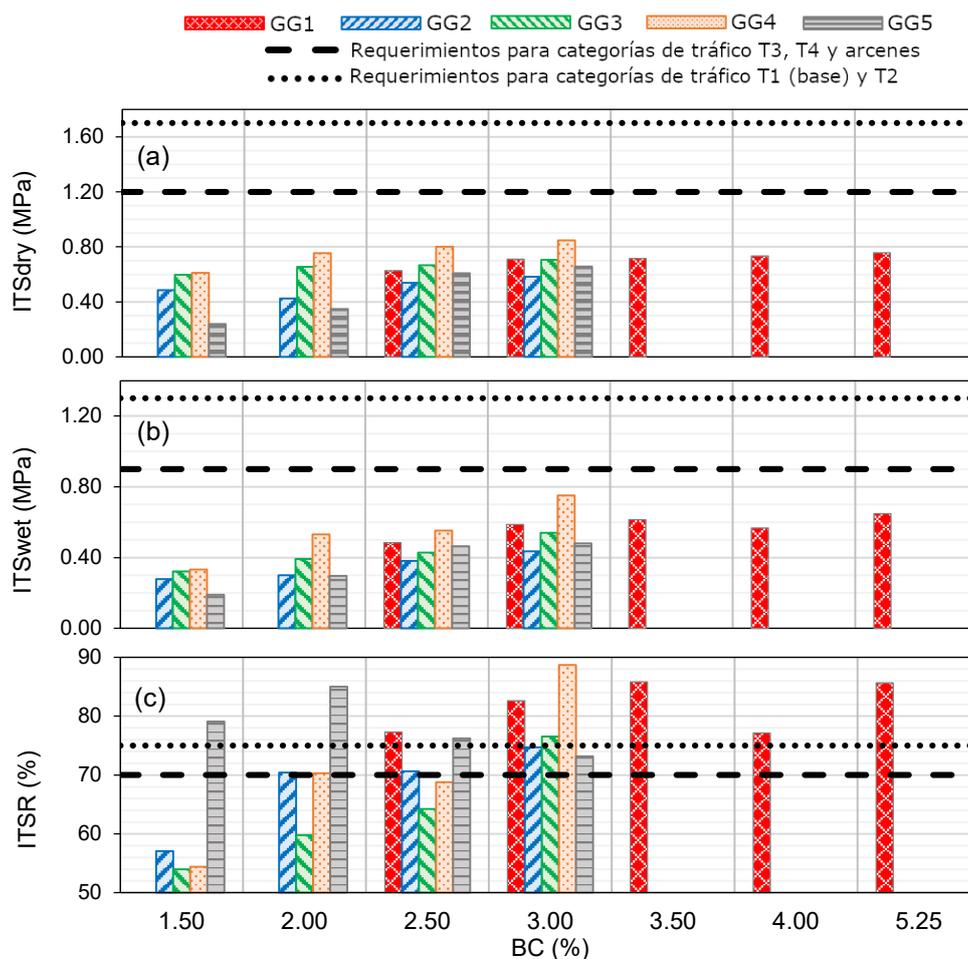


Figura 13 – Resultados de ITS_{dry} , ITS_{wet} , e $ITSR$ de los grupos giratorios

La tendencia general de todos los grupos giratorios es aumentar ligeramente los resultados de ITS, tanto seco como húmedo, con el aumento del BC. El GG1 no cumplió los requisitos mínimos de ITS para ningún BC, pero siempre cumple los valores mínimos de ITSR. Al reducir el AWC, GG2 no sólo sigue sin cumplir, sino que empeora los resultados de ITS_{dry} e ITS_{wet} , y también de ITSR. El aumento del número de giros de compactación hizo que GG3 y GG4 aumentaran el ITS_{dry} y el ITS_{wet} en comparación con GG2. La adición de cemento (GG5 en comparación con GG2) condujo a mejoras en ITS_{dry} e ITS_{wet} para 2.50% y 3.00% BC, pero para el 1.50% y 2.00% BC los resultados de ITS_{dry} e ITS_{wet} disminuyeron.

Es posible comparar GG1, GG2 y GG3, ya que todos fueron compactados con 100 giros. GG1 tenía el mayor AWC, proporcionado por la Ecuación 2, y mostró los resultados más altos de ITS_{dry} e ITS_{wet} . Por lo tanto, el uso de un mayor, y adecuado, contenido de agua (GG1 comparado con GG2) fue más beneficioso que la adición de cemento (GG5 comparado con GG2). De hecho, GG1 cumplió los requisitos de ITSR para todas las BC estudiadas.

La aplicación de 200 giros hizo que el GG4 mostrara los valores más altos de ITS_{dry} e ITS_{wet} de todos, sin embargo, siguió sin cumplir los requerimientos del PG-4, los cuales mostraron ser muy exigentes. Cabría esperar que las mezclas que cumplieron los requisitos del anterior método de diseño de la OC 8/2001 siguieran cumpliendo, y siendo mezclas válidas según el actual método de la OC 40/2017,

pero no es así. Además, tras comparar con otros manuales y especificaciones internacionales, se observó que para este tipo de material los valores de ITS pedidos suelen ser significativamente menores, concluyendo que los actuales requerimientos deben ser revisados por ser poco realistas para una mezcla bituminosa reciclada en frío.

Conclusiones y recomendaciones

- Las CRM con 1.50%, 2.00% y 2.25% de ligante residual cumplieron los requerimientos del antiguo PG-4 de la OC 8/2001 (compactación estática y ensayo inmersión-compresión) para los niveles de tráfico más bajos. Los mejores resultados los mostró la CRM con un 2.00% de BC y un 1.92% de AWC.
- Las CRM fabricadas según el actual PG-4 (GG1) no cumplieron los requerimientos mínimos de ITS. Contenidos ascendentes de BC mostraron mayores valores de ITS. Los resultados de resistencia conservada (ITSR) fueron adecuados.
- Para que los requerimientos del PG-4 actual sean valores más realistas para una CRM, éstos deben ser revisados. Según los resultados obtenidos y una revisión de otros métodos de diseño, se propone una reducción del 40%. Sin embargo, se considera necesario seguir investigando para establecer una corrección más justificada. En cuanto a los límites de ITSR, se recomienda mantener los valores mínimos especificados actualmente.
- La formulación de la Ecuación 2 indicada en el actual PG-4 mostró mejores resultados. Este contenido mayor de AWC fue beneficioso para el mezclado y la compactación, llevando a mejores resultados de comportamiento mecánico.
- La compactación estática realizada se consideró excesiva, ya que produjo densidades significativamente más altas que las obtenidas en el campo, mientras que la compactación giratoria representó mejor la compactación en el campo. Se recomienda mantener la compactación giratoria en el método de diseño actual para CRM.
- El aumento del número de giros de 100 a 200 dio lugar a un aumento importante del ITS, pero todavía no cumplía los requisitos. El aumento de las densidades no fue muy significativo, por lo que el incremento de giros se consideró ineficiente. Se recomienda mantener 100 giros en el actual PG-4, siempre y cuando se revisen los requisitos del ITS.
- La adición de 1,00% de cemento no mostró una tendencia clara. Redujo los resultados del STI para los CRM con menor BC y los aumentó para los CRM con mayor BC. Se consideró que los motivos de este empeoramiento de resultados pudieron ser un procedimiento de curado desacertado y una incorrecta dosificación de agua, lo cual produjo un desarrollo inadecuado de las propiedades mecánicas.

2. Propiedades volumétricas de mezclas bituminosas recicladas en frío según distintos métodos de compactación. Un estudio de la compactación giratoria

Los resultados de la sección anterior revelaron cómo el método de compactación es un factor clave en la fabricación de CRM. Para poder diseñar pavimentos de alta calidad, es esencial asegurar la

producción de probetas de laboratorio de alta calidad, las cuales aseguren una correcta caracterización de este material. Existen muchos estudios de compactación en laboratorio de CRM que buscan simular al máximo la compactación en campo, pero no hay un consenso, y no está claro qué procedimiento de compactación es el más adecuado (Filho et al., 2020; Jin et al., 2021; Liu et al., 2018; Yang et al., 2021).

Durante el estudio descrito en esta sección, se investigó la influencia de diferentes métodos de compactación, y la variación de sus parámetros, en las propiedades volumétricas de CRM fabricadas con 100% de RAP y una proporción fija de emulsión bituminosa y agua añadida. El estudio se dividió en dos partes (Figura 14): primero, un estudio de compactación giratoria, en el que se prepararon probetas de CRM utilizando un amplio abanico de giros de compactación giratoria; y, en segundo lugar, se prepararon probetas de CRM utilizando compactación estática y de impactos (Marshall). En ambos casos, se calcularon las propiedades volumétricas según tres métodos diferentes (procedimientos geométricos, probeta impermeabilizada y densidad seca) y se compararon los resultados obtenidos. La comparación permitió definir el método de compactación más adecuado para reproducir las características en el campo. De nuevo, esta sección pretende resumir los procedimientos empleados, así como resultados y conclusiones obtenidas, las cuales fueron publicadas en Orosa et al. (2021) y pueden ser consultados para más detalles.

Materiales y métodos

Todas las CRM fabricadas en esta sección emplearon el mismo RAP de la sección anterior con la distribución granulométrica mostrada en la Figura 8. Se empleó, del mismo modo, una emulsión bituminosa catiónica C60B5-REC. El diseño de mezcla empleado fue el que resultó óptimo de acuerdo con el método del PG-4 de la OC 8/2011, de un 2.00% de ligante residual y un 1.92% de agua añadida, manteniendo el contenido óptimo de fluidos resultado del ensayo Proctor Modificado (MPT). La metodología seguida en el estudio se resume en la Figura 14.

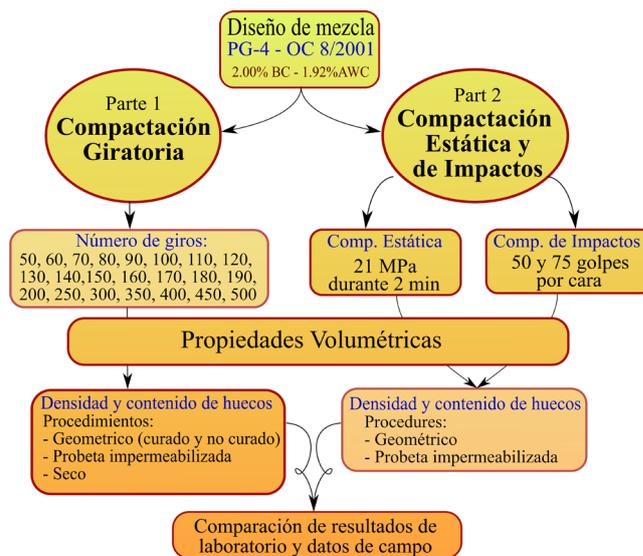


Figura 14 – Diagrama de la metodología seguida para el estudio de la compactación

La compactación giratoria se llevó a cabo de acuerdo con la norma EN 12697-31 (Figura 15), con un ángulo interno de rotación de 0.82° , una velocidad de 30 rpm y una presión de compactación de 600 kPa, produciendo probetas con un diámetro medio de 99.7 mm y una altura de 63.5 ± 1.5 mm. Se emplearon 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 250, 300, 350, 400, 450 y 500 giros, formando 22 grupos de probetas, con 3 probetas en cada grupo. Para la nomenclatura, se utilizó la letra G seguida del número de giros (por ejemplo, G-50 para el grupo compactado con 50 giros, y así sucesivamente). Utilizando los pesos de las mezclas antes y después de la compactación, y antes y después del curado, fue posible comprobar la pérdida de agua durante el proceso de fabricación y compararla con el AWC real utilizado. El artículo completo Orosa et al.

(2021) "Assessment of two laboratory design methods for CIR mixtures with bitumen emulsion based on static and gyratory compaction" *Construction and Building Materials*, 265, 120667, contiene una explicación más detallada de este procedimiento de medida de pérdida de agua.

La compactación estática (Figura 16) se realizó según la norma NLT 161, produciendo probetas de 101.6 mm de diámetro y 100 mm de altura (grupo denominado S), y consistiendo en una precarga vertical de 1 MPa durante 60 s, seguida de una etapa de 120 s durante la cual la carga se incrementó linealmente hasta 21 MPa. La carga se mantuvo durante 120 s y luego se redujo linealmente hasta 0 MPa.

La compactación de impactos (Marshall) se llevó a cabo de acuerdo con la norma EN 12697-30 (Figura 17), produciendo probetas con un diámetro de 101.6 mm y una altura de 63.5 ± 1.5 mm. Un grupo de probetas se compactó con 50 golpes en cada lado, y otro con 75 golpes en cada lado (grupos denominados M50 y M75).

Todas las probetas se curaron desmoldadas durante 3 días a 50 °C en estufa ventilada, siguiendo las recomendaciones del PG-4.

Las propiedades volumétricas se obtuvieron siguiendo diferentes procedimientos:

- Densidad específica máxima, ρ_m , se determinó según la norma EN 12697-5, empleando un picnómetro. La densidad máxima es una propiedad intrínseca del material relacionada con los materiales constituyentes y la composición de la mezcla; en este estudio, se obtuvo como media de tres muestras de CRM sin compactar.
- Densidad geométrica inicial, $\rho_{o,g}$, se calculó en las probetas compactadas con un compactador giratorio, antes del procedimiento de curado. El compactador giratorio dispone de transductores de desplazamiento LDVT que registran la evolución de la altura (h) de las probetas con el número de ciclos, durante la compactación. Con esta altura, sabiendo el diámetro interior del molde (100 mm), y conociendo el peso de la muestra introducida (W1), es posible calcular la evolución de las densidades a lo largo del proceso de compactación. Esto permitió, para cada probeta, trazar la curva de compactación con la evolución de la densidad, y seleccionar como $\rho_{o,g}$ el valor de la densidad obtenido en el último ciclo de compactación.
- Densidad aparente - método de la probeta impermeabilizada, $\rho_{b,s}$, se calculó en probetas curadas, aplicando el procedimiento C de la norma EN 12697-6. Para las mezclas asfálticas abiertas, como el caso de las CRM (es decir, con un contenido de vacíos de aire del 10% o más), se recomienda este método para que las probetas sean impermeables, evitando que el agua entre en los poros accesibles.
- Densidad aparente por el método de las dimensiones, $\rho_{b,g}$, se calculó en probetas curadas, empleando el procedimiento D de la norma EN 12697-6. Se trata de



Figura 15 – Probetas impermeabilizadas con parafina, y peso sumergido

un procedimiento válido para la mayoría de mezclas, independientemente del nivel de huecos de aire en la probeta.

- Densidad aparente - en seco, $\rho_{b,d}$, siguiendo el procedimiento A de la norma EN 12697-6, siendo un método recomendado en la EN 12697-8 para mezclas que contienen agua.
- V_a : Contenido de huecos de aire, calculados para cada una de las densidades según la norma EN 12697-8.

Resultados y discusión

Los resultados de densidades volumétricas en términos de densidades aparentes y volumen de huecos de aire se representan en las Figuras 19, 20 y 21, junto con valores de campo, extraídos de informes y literatura científica, y se representan como áreas sombreadas. La densidad objetivo o target, se indica mediante una línea horizontal, correspondiendo con el 100% de la densidad obtenida en el ensayo Proctor Modificado, según el PG-4.

Respecto a la primera parte del estudio, las densidades de las probetas preparadas con compactador giratorio, empleando cuatro procedimientos diferentes, se representan en la Figura 19. La $\rho_{0,g}$, calculada antes del curado, 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 19). 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 se alcanzó después de 140 giros en el caso de la $\rho_{b,g}$, y después de 120 giros en el caso de la $\rho_{b,s}$.

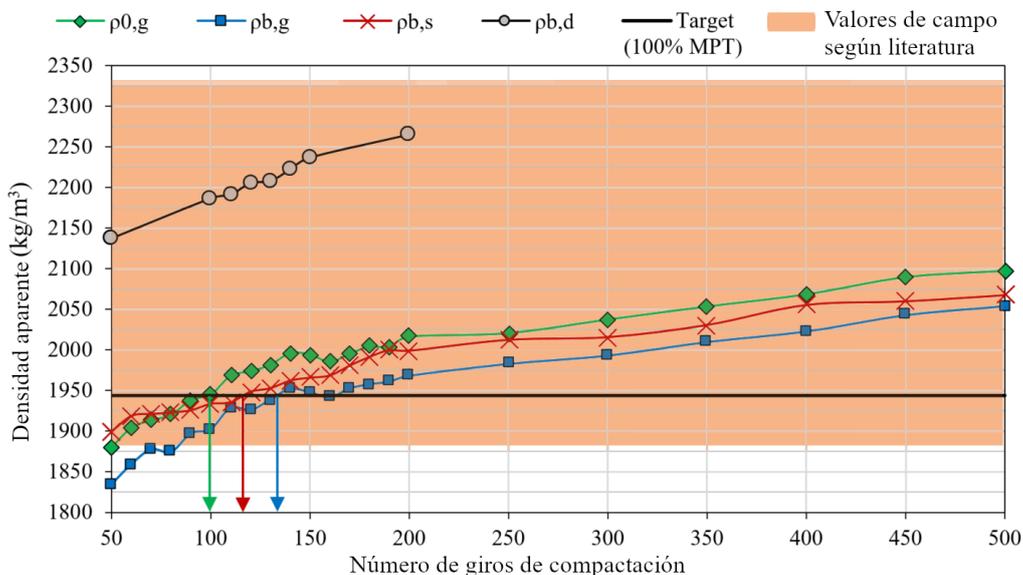


Figura 16 – Densidad aparente según distintos métodos de probetas preparadas con compactador giratorio

Mientras que en manuales y guías de diseño de CRM no se suele indicar un rango requerido de contenido de huecos de aire, a partir de los resultados de campo recopilados se encontró que valores habituales están en torno al 8–16%, rango que se representa junto con los resultados del V_a en la Figura 19. Se observa que en el caso de los métodos geométrico, $V_{a,g}$, y de probeta impermeabilizada, $V_{a,s}$, fueron necesarios entre 350 y 500 giros para alcanzar el rango de valores de campo; mientras que para el número habitual de giros (100–150), los resultados de V_a eran muy elevados según estos métodos. Por otro lado, utilizando el método en seco, $V_{a,d}$, los valores de huecos resultaron mucho menores, bajando del 12%.

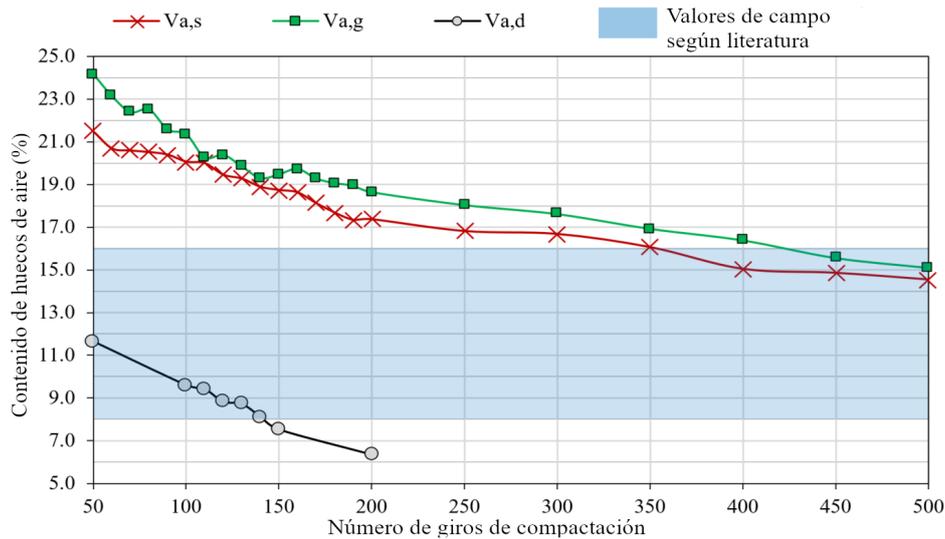


Figura 17 – Volumen de huecos de aire de probetas preparadas con compactador giratorio

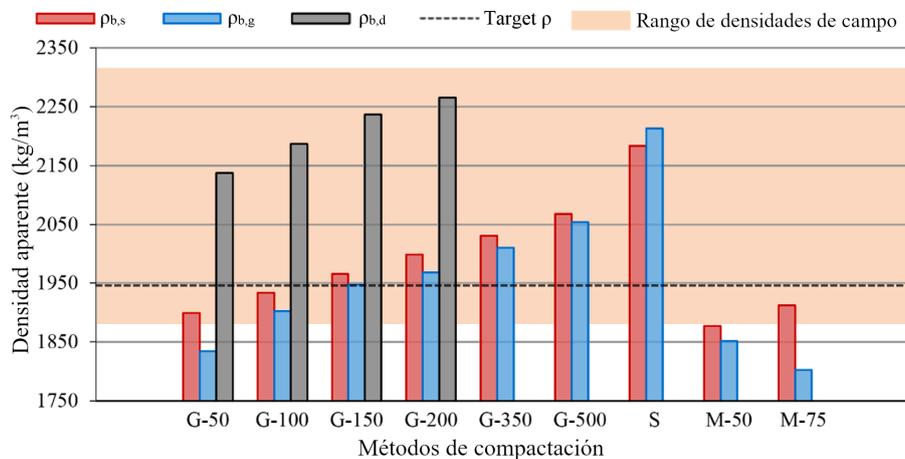


Figura 18 – Densidad aparente de probetas compactadas con distintos métodos de compactación

Con respecto a la segunda parte, el gráfico de barras de la Figura 21 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, mientras que el método estático, a pesar de mostrar densidades dentro del rango de valores en campo de la literatura, se considera demasiado fuerte, produciendo densidades muy altas en comparación con la densidad target, pudiendo llegar a producir rotura de los áridos. La versatilidad y comodidad del método giratorio, sumado a su adecuada simulación de la compactación de campo, lo convierten en el método de

compactación más apropiado para las CRM, y el preferido por la mayoría de profesionales (Liu et al., 2018; Tebaldi et al., 2014).

Una mayor discusión de los resultados y comparación entre métodos puede ser consultada en el artículo completo Orosa et al. (2021) "Compaction and volumetric analysis of cold in-place recycled asphalt mixtures prepared using gyratory, static, and impact procedures" *Construction and Building Materials*, 296, 1236201.

Conclusiones principales

- Los valores de densidad antes del curado son siempre superiores a después del curado, debido al agua presente en el interior de los poros de las probetas.
- Los resultados de densidad obtenidos por el procedimiento de probeta impermeabilizada fueron un 1.50% más altos que los obtenidos por el procedimiento geométrico.
- La densidad calculada mediante el procedimiento en seco mostró valores muy superiores al resto de métodos debido al elevado contenido de huecos en las CRM, y no se recomienda.
- La compactación giratoria es el método que mejor se ajustó a la densidad objetivo, alcanzándola después de 120–140 giros.
- La compactación estática con 21 MPa siempre superó significativamente la densidad objetivo debido a la alta presión aplicada, pudiendo incluso provocar la rotura de los áridos y la compresión del ligante. No se considera adecuada para CRM.
- La compactación de impactos produjo probetas con densidades muy bajas, y no se alcanzaron ni los valores de densidad de referencia en el campo ni los valores objetivo, por lo que se consideró inadecuada para CRM.
- El método de compactación giratoria resultó ser el más adecuado para la producción y caracterización volumétrica en laboratorio de CRM, siendo además el más cómodo y versátil, permitiendo monitorizar el proceso de compactación durante su ejecución.

3. Efecto de las características del RAP en las propiedades volumétricas y mecánicas de las mezclas bituminosas recicladas en frío

El RAP es un material heterogéneo y que presenta una gran variabilidad, no solo en cuanto a su origen, sino también en lo referente al contenido de ligante o su nivel de envejecimiento. Además, el proceso de fresado también influye en el tamaño máximo nominal (NMS) del RAP y en su distribución granulométrica; y, además, partículas de RAP que a simple vista puedan parecer similares pueden, en realidad, consistir en un único árido recubierto de ligante o, por el contrario, estar compuesta por muchos áridos más finos unidos por un mástico, dificultando más su caracterización. Las propiedades de las CRM dependerán, por lo tanto, de todas estas características del RAP (Fedrigo et al., 2021); y mientras que para áridos naturales existen clasificaciones basadas en sus propiedades,



Figura 19 – RAP originario de A Coruña

no ocurre lo mismo con el RAP (Perraton et al., 2016; Tebaldi et al., 2019). Por ello, numerosos autores han analizado las propiedades de CRM resultado del empleo de RAP con distintas características (Raschia, Mignini, et al., 2019; Raschia et al., 2021).



Figura 20 – RAP originario de Quebec

Durante el estudio descrito en esta sección, se investigó el efecto del empleo de RAP con distintas granulometrías y NMS en las propiedades volumétricas y mecánicas de CRM. Los resultados obtenidos fueron el fruto de trabajos realizados por el autor en la École de Technologie Supérieure (ÉTS) de Montreal (Canadá), durante una de las estancias predoctorales, y en la ETS de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidade da Coruña (UDC), y fueron publicados en Orosa et al. (2022) "Compactability and mechanical properties of cold recycled mixes prepared with different nominal maximum sizes of RAP" *Construction and Building Materials*, 339, 127689.

Materiales y métodos

Se fabricaron tres CRM en la ÉTS con RAP del mismo origen (Figura 23), y con distinto NMS (5 mm, 10 mm, y 20 mm); mientras que para la CRM fabricada en la UDC se usó una fuente diferente de RAP, con un NMS de 22.4 mm (Figura 22). En la Figura 24 se muestra la comparación de las cuatro distribuciones granulométricas consideradas.

Las proporciones de ligante residual y agua añadida fueron constantes en todos los casos, y análogas a las empleadas en la anterior sección. Para la compactación se emplearon el método giratorio con 100 y 200 giros, y moldes de 100 mm y 150 mm de diámetro; mientras que el método de impactos se realizó con 50 golpes por cara. Además de las propiedades volumétricas

(densidad aparente y volumen de huecos de aire), antes y después del curado acelerado durante 3 días a 50 °C, se evaluó la rigidez y el fallo mecánico a distintas temperaturas.

La rigidez se evaluó mediante el ensayo de Módulo de Rigidez de Tracción Indirecta (ITSM), el ensayo dinámico de Resonancia de Impacto (IR) y el ensayo cíclico de Tensión-Compresión (TC) para determinar el Módulo Complejo (CM). Se pudieron comparar los diferentes resultados de los módulos de rigidez y discutir la viabilidad de utilizar el novedoso y sencillo método de ensayo dinámico IR como sustituto del ensayo cíclico TC tradicional. Finalmente, se determinó el comportamiento al fallo mecánico mediante el ensayo de resistencia a la tracción indirecta (ITS) y el ensayo de flexión semicircular (SCB). Una mayor explicación sobre los ensayos puede consultarse en Orosa et al. (2022).

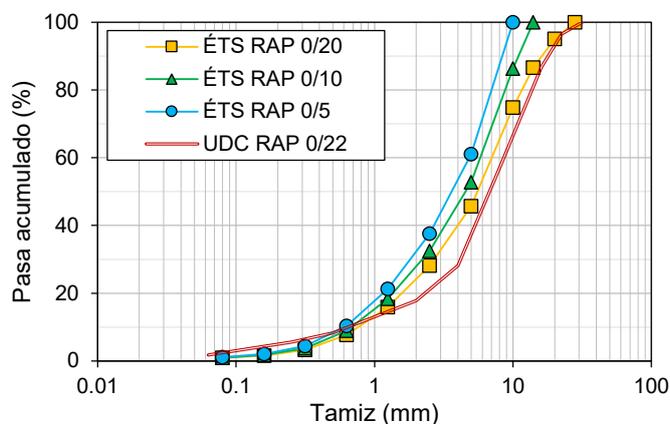


Figura 21 – Distribuciones granulométricas del RAP

En la Tabla 2 se resumen los distintos grupos de mezclas preparadas, en función del RAP y compactación empleados, y los ensayos realizados sobre cada grupo.

Tabla 2 – Características de las CRM preparadas. Nomenclatura, compactación y ensayos

ÉTS					
Nomenclatura CRM	NMS	Compactación	Nº de probetas	Ensayos	
ETS20_G100_D100	20 mm	Giratorio, 100 giros Ø* 100 mm	4	Densidad	ITSM
ETS10_G100_D100	10 mm		4		
ETS5_G100_D100	5 mm		4		
ETS20_M50_D100	20 mm	Marshall, 50 golpes Ø 100 mm	4	IR	ITS
ETS10_M50_D100	10 mm		4		
ETS5_M50_D100	5 mm		4		
ETS20_G200_D100	20 mm	Giratorio, 200 giros Ø 100 mm	3	Densidad	ITS
ETS10_G200_D100	10 mm		3		
ETS5_G200_D100	5 mm		3		
ETS20_G100_D150	20 mm	Giratorio, 100 giros Ø 150 mm	1 (8 SCB)	Densidad	SCB
ETS10_G100_D150	10 mm		1 (8 SCB)		
ETS5_G100_D150	5 mm		1 (8 SCB)		
UDC					
UDC22_G100_D100	22.4 mm	Giratorio Ø 100 mm	100 giros.	4	Densidad
UDC22_G200_D100			200 giros	4	
UDC22_M50_D100		Marshall, 50 golpes, Ø 100 mm	4	ITS	

*Ø = diámetro de las probetas

Resultados y discusión

Las propiedades volumétricas en términos de contenido de huecos de aire se resumen en la Tabla 3, donde se pueden observar resultados antes y después del curado ($V_{a,0}$ y V_a), según el RAP y compactación utilizados. Las curvas de compactación giratoria (Figura 25) mostraron un patrón bastante paralelo, por lo que el nivel de compactación obtenido después de un cierto número de giros estuvo fuertemente influenciado por la compactación experimentada en los primeros giros, o "autocompactación", coincidiendo con resultados de otros autores (Meknaci et al., 2021).

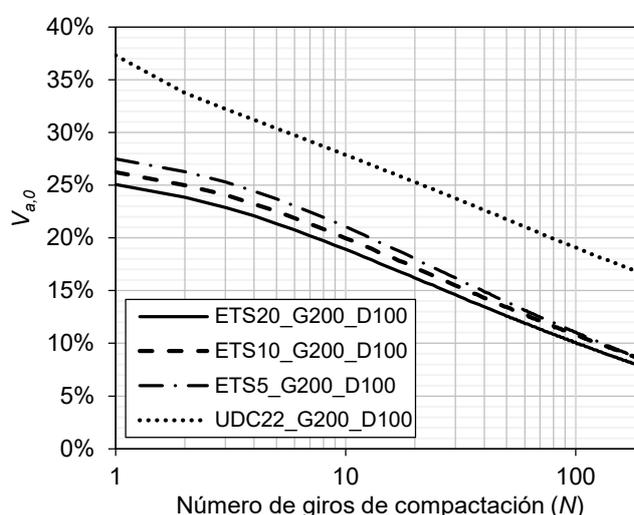


Figura 22 – Curvas de compactación giratoria

Las CRM preparadas en la ÉTS mostraron un incremento del V_a con la reducción del NMS del RAP. Sin embargo, el V_a de la CRM preparada en UDC fue significativamente mayor, lo que se atribuyó a la falta de partículas de tamaño intermedio y a un mayor contenido de partículas finas, poniendo de manifiesto una mayor influencia de la distribución granulométrica del RAP en la compactabilidad de las CRM comparada con la variación del NMS.

Tabla 3 – Densidad máxima (ρ_m), contenido de huecos de aire (V_a in %) y desviaciones estándar (subindex), antes y después de curado, según el tipo de RAP y compactación empleados.

	RAP source and NMS							
	ETS 20		ETS 10		ETS 5		UDC 22	
	$\rho_m = 2517.07 \text{ kg/m}^3$		$\rho_m = 2507.60 \text{ kg/m}^3$		$\rho_m = 2501.68 \text{ kg/m}^3$		$\rho_m = 2419.22 \text{ kg/m}^3$	
	$V_{a,0}$	V_a	$V_{a,0}$	V_a	$V_{a,0}$	V_a	$V_{a,0}$	V_a
G100_D100	10.5 0.5%	12.6 0.4%	10.6 0.4%	12.7 0.3%	11.9 0.3%	13.9 0.2%	19.6 1.2%	21.4 1.1%
G100_D150	9.6 0.0%	12.0 0.02%	10.7 0.1%	12.8 0.2%	11.3 0.1%	13.8 0.2%		
G200_D100	8.1 0.3%	10.2 0.5%	8.6 0.1%	10.7 0.3%	8.6 0.1%	10.7 0.2%	16.6 0.3%	18.6 0.2%
M50_D100	16.1 0.7%	20.2 0.7%	17.7 0.3%	21.6 0.3%	19.4 0.3%	24.2 0.3%		25.5 0.3%

En el artículo completo se presenta un análisis en detalle de la influencia de la variación del NMS del RAP, la temperatura, y contenido de huecos de las mezclas en la rigidez obtenida por distintos métodos (Orosa et al., 2022). En esta sección se resumen los resultados y conclusiones más relevantes.

En primer lugar, las Figuras 26 y 27 muestran la comparación de resultados de módulo de rigidez, E, obtenidos mediante el ensayo ITSM y el ensayo dinámico IR para probetas compactadas con métodos giratorio (Figura 26) y Marshall (Figura 27).

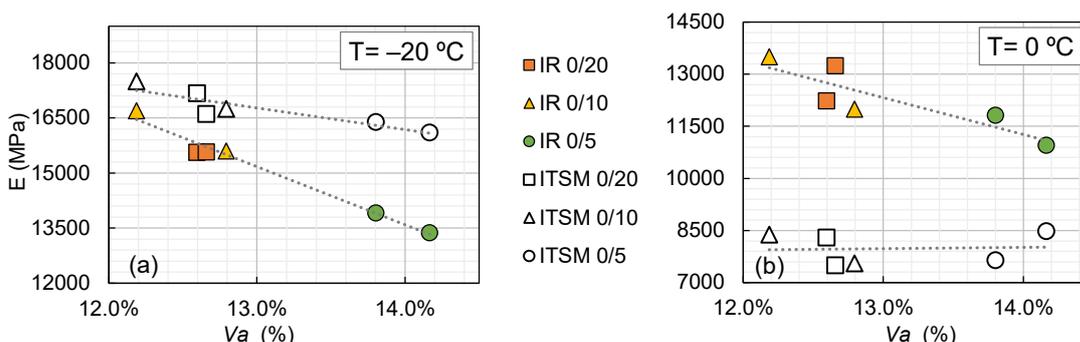


Figura 23 – Comparación entre resultados de ITSM y de módulo dinámico IR a (a) $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, y (b) $0 \text{ }^\circ\text{C}$, obtenidos para las mismas probetas de CRM compactadas con método giratorio

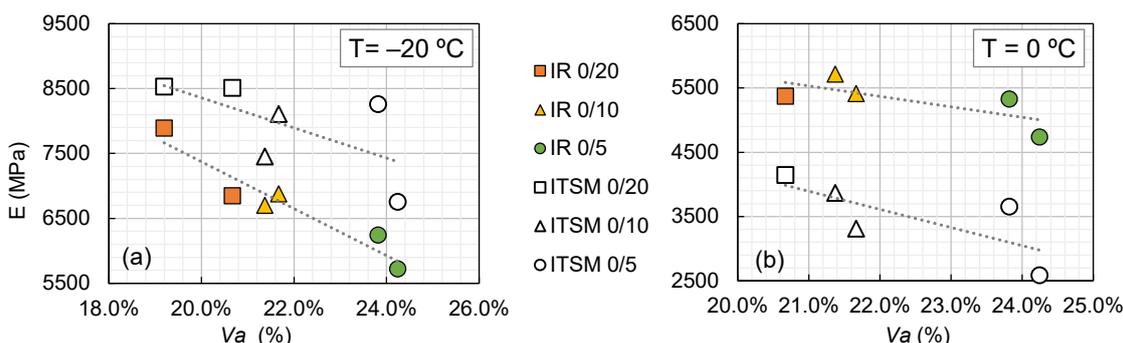


Figura 24 – Comparación entre resultados de ITSM y de módulo dinámico IR a (a) $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, y (b) $0 \text{ }^\circ\text{C}$, obtenidos para las mismas probetas de CRM compactadas con método Marshall

A $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, los resultados del ITSM fueron un 10.2% superiores, en promedio, a los obtenidos con los ensayos dinámicos IR para las probetas giratorias (Figura 26a), y un 18.7% superiores en el caso de las probetas Marshall (Figura 27a). Por otro lado, a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ la dispersión fue mayor, y en este caso, al contrario que ocurría anteriormente, los resultados del ITSM fueron un 34.7% inferiores a los obtenidos por el método IR para las probetas giratorias (Figura 26b) y un 37.0% inferiores para las probetas Marshall (Figura 27b).

Se observa un comportamiento significativamente dependiente de la temperatura, con un aumento generalizado de valores de rigidez a temperaturas más bajas. La tendencia a la reducción de la rigidez estuvo principalmente influenciada por el aumento del contenido de huecos de aire, más que por la variación de NMS, siendo la temperatura el factor con mayor efecto. A pesar de que no se pudo extraer una clara relación entre los ensayos, se verificó en ambos casos la correlación con el nivel de compactación y las propiedades volumétricas.

La Figura 28a muestra, de forma conjunta, los resultados de módulo complejo, E^* , de los ensayos TC e IR, así como el conocido modelo 2S2P1D ajustado mediante la ecuación de Williams-Landel-Ferry, con los parámetros de la Figura 28c. A través del gráfico Cole-Cole (Figura 28b) se pudo concluir que hubo una buena continuidad de las mediciones realizadas con los ensayos TC a varias temperaturas, lo que indica que el material es reológicamente simple y que es aplicable el principio de superposición tiempo-temperatura.

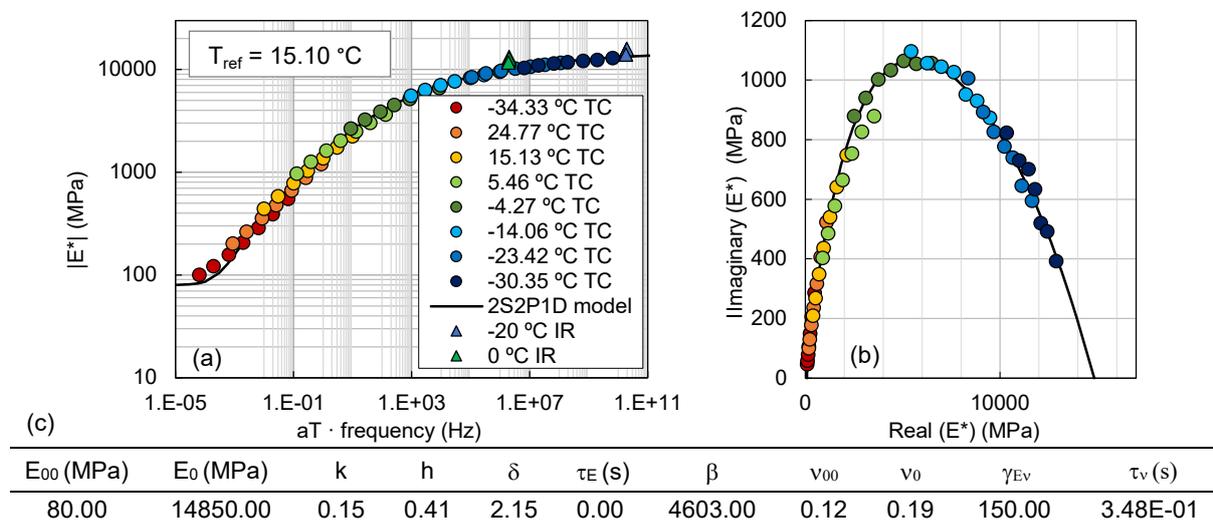


Figura 25 – Comparación entre el módulo complejo obtenido mediante ensayos TC y ensayos dinámicos IR

Los valores de la norma del módulo complejo obtenidos a partir de los ensayos IR dinámicos fueron superiores a los obtenidos con el ensayo TC para las mismas frecuencias reducidas (Figura 28a). Estas diferencias fueron menores a frecuencias mayores (y temperaturas menores), y se explican debido a los diferentes niveles de deformación de cada ensayo (50 $\mu\text{m}/\text{m}$ para los ensayos TC, frente a 0.1 $\mu\text{m}/\text{m}$ para los ensayos dinámicos IR), presentando las mezclas asfálticas un comportamiento fuertemente dependiente del nivel de deformación. Sin embargo, dada la simplicidad y versatilidad del novedoso ensayo IR dinámico, se considera una alternativa prometedora al ensayo TC.

Las CRM preparadas en la ÉTS y la UDC se compararon mecánicamente en base a los resultados de los ensayos de ITS, evaluando el efecto de la variación de NMS, el método de compactación y contenido de huecos de aire. Los resultados de ITS de las CRM compactadas con cada método de compactación se normalizaron y se representaron en los gráficos de la Figura 29, indicando el promedio en cada caso.

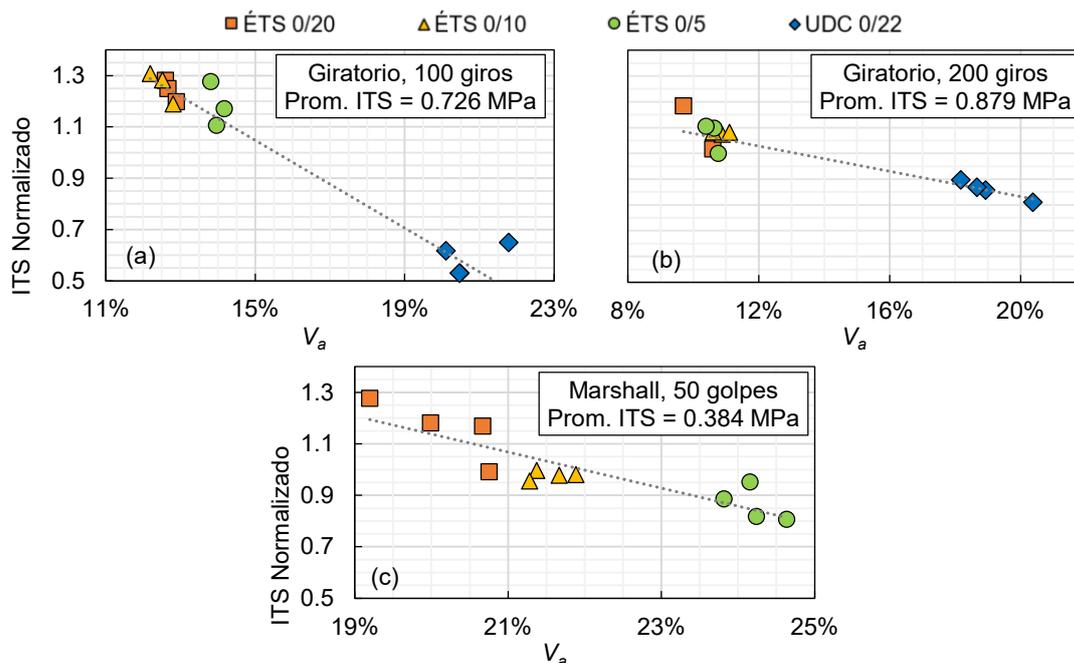


Figura 26 – Resultados de ITS normalizado de CRM preparadas con (a) 100 giros de compactación, (b) 200 giros de compactación, y (c) 50 golpes de martillo Marshall

Los gráficos de la Figura 29 mostraron una clara influencia del V_a en los resultados del ITS. Las CRM compactadas con 100 giros mostraron mayor variación en los resultados con el V_a comparadas con aquellas compactadas con 200 giros. La variación del NMS del RAP no mostró tendencias claras en términos de resultados de ITS, siendo los V_a de las mezclas ÉTS muy similares.

Finalmente, en la Figura 30 se ilustran los resultados del ensayo SCB de las mezclas preparadas en ÉTS con los diferentes NMS de RAP, a diferentes temperaturas. A las temperaturas más bajas, las mezclas con menor NMS de RAP mostraron el mejor comportamiento, mientras que, con el aumento de las temperaturas, la tendencia cambió. A 0 °C no existió una tendencia claramente definida, y a 20 °C el mejor comportamiento lo mostraron las CRM con mayor NMS de RAP, atribuyéndose este resultado a la gran influencia del esqueleto mineral con el aumento de la temperatura. Independientemente del NMS, la temperatura fue el parámetro con mayor influencia, deteriorando el comportamiento de agrietamiento con el aumento de la temperatura.

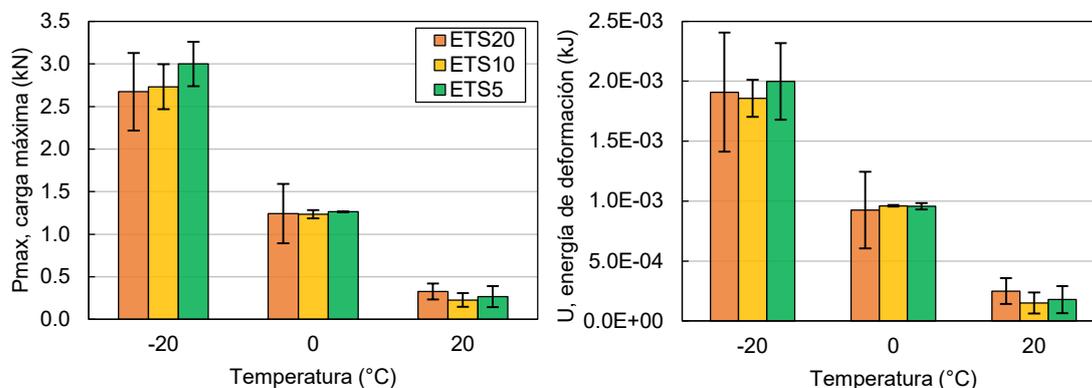


Figura 27 – Resultados del ensayo SCB de las CRM preparadas con distintos NMS de RAP: (a) Carga máxima, P_{max} ; (b) energía de deformación, U

Conclusiones principales

- Las propiedades volumétricas de las CRM estudiadas se vieron más influenciadas por la distribución granulométrica del RAP que por el tamaño máximo nominal. Las densidades alcanzadas con la compactación giratoria dependieron en gran medida del encaje y ajuste iniciales entre partículas.
- La temperatura resultó ser el parámetro más influyente en todas las propiedades mecánicas medidas. A temperaturas más bajas, los módulos de rigidez obtenidos fueron más altos, el comportamiento de fallo mostró mayores resistencias y los resultados mostraron una menor dispersión.
- Las rigideces obtenidas en los ensayos ITSM y dinámicos IR mostraron una fuerte dependencia del volumen de huecos de aire, especialmente para las temperaturas más bajas, siendo los valores de rigidez mayores cuando el contenido de huecos de aire era menor. La influencia del NMS del RAP fue menor y no mostró tendencias claras.
- Los ensayos IR dinámicos son una valiosa alternativa a los ensayos TC para evaluar el comportamiento viscoelástico lineal (LVE) de las mezclas asfálticas. Los ensayos dinámicos IR son rápidos, baratos y no destructivos, y pueden determinar el LVE de los materiales bituminosos en una amplia gama de frecuencias y temperaturas.
- El volumen de huecos tuvo un efecto fundamental en los resultados del ensayo ITS, mientras que la variación de NMS no tuvo efectos claros para un V_a similar. El SCB a 0 y 20 °C mostró resultados sin diferencias significativas, pero a -20 °C el mejor comportamiento lo mostraron las CRM preparadas con menor NMS de RAP.

Independientemente de las propiedades del RAP o de las temperaturas, una conclusión clara de este estudio es el papel crucial del nivel de compactación, siendo el volumen de huecos de aire el parámetro fundamental en todas las propiedades mecánicas medidas. El uso de una determinada energía de compactación no siempre garantiza un contenido de huecos igual; y, por lo tanto, se considera importante, a raíz de los resultados obtenidos, que los requisitos mecánicos definidos en los manuales y guías de diseño para CRM incluyan también un nivel específico de compactación a alcanzar.

4. Comportamiento mecánico no lineal de mezclas bituminosas recicladas en frío y su evolución con el tiempo de curado

Durante la operación de reciclado de pavimentos asfálticos, lo habitual es mezclar un agente estabilizador con el material reciclado para promover la unión y cohesión entre las partículas y mejorar su comportamiento. Aunque existen multitud de agentes estabilizadores, los más utilizados y conocidos son el cemento y el betún (en forma de emulsión bituminosa o de espuma), formando Materiales Tratados con Cemento (CTM) o Materiales Estabilizados con Betún (BSM), respectivamente. La selección del agente estabilizador determinará el comportamiento particularmente diferente de las mezclas recicladas obtenidas (Figura 31), siendo los CTM materiales continuos (*bounded*), con una mayor resistencia y rigidez, también más frágiles y susceptibles de agrietarse, debido a las

características del cemento; mientras que los BSM (y, en general, las CRM) presentan un comportamiento diferente, y además de las propiedades viscoelásticas típicas de los materiales bituminosos, que también presentan una respuesta mecánica que recuerda en cierto modo al de los materiales granulares sueltos (*unbounded*), dependiente del nivel de tensión al que se ven sometidos, pero con una cohesión significativamente mayor debida al ligante bituminoso (*half-bounded*). Este comportamiento particular es especialmente relevante en las primeras etapas del curado, cuando el ligante aún no proporciona

una cohesión completa y el contenido de agua en la mezcla es mayor. Por este motivo, se considera razonable estudiar su comportamiento mediante ensayos triaxiales bajo diferentes presiones de confinamiento (Casillas & Braham, 2021; Ebels, 2008; Gómez-Meijide & Pérez, 2015; Jenkins et al., 2007; Santagata et al., 2010), siendo un enfoque ya contemplado en las directrices técnicas sudafricanas para diseño de BSM (Asphalt Academy, 2020). Siguiendo este planteamiento, para caracterizar completamente el comportamiento mecánico de las CRM estudiadas en este trabajo de investigación, se realizaron varias campañas de ensayos triaxiales de diferentes tipos, y el objetivo de cada uno de ellos se resume a continuación:

- Ensayos triaxiales dinámicos (DTx), realizados con diferentes presiones de confinamiento constante (PCC) y variación sinusoidal de la tensión desviadora. Como resultado de los DTx se obtuvieron los módulos resilientes (M_r), no lineales y dependientes del nivel de tensión.
- 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 y ángulo de fricción interna) y las envolventes de fallo de Mohr-Coulomb.
- Ensayos triaxiales de carga repetida de deformación permanente (RLPDTx), se realizaron con una PCC, y hasta 90000 ciclos de carga cíclica vertical, de valor obtenido en función de la tensión de fallo resultado de los MTx (Stress Ratios – SR).

Mientras que en la anterior sección se trató la respuesta viscoelástica de los CRM, con dependencia fundamental de temperatura y frecuencia de carga (Orosa et al., 2022), la investigación descrita en la presente sección estuvo dedicada al estudio del comportamiento mecánico no lineal y dependiente del nivel tensional, y se diferenciaron dos fases según los ensayos triaxiales realizados (Tabla 4). Los

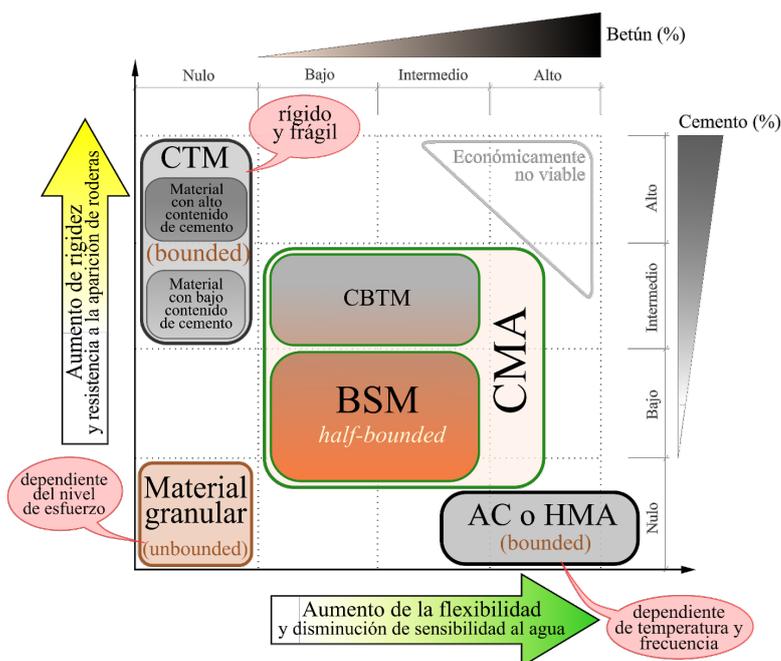


Figura 28 – Diagrama conceptual del comportamiento de materiales empleados en pavimentos en función de las proporciones de betún y cemento (Orosa, 2022)

resultados obtenidos permitieron elaborar tres artículos científicos, de los cuales dos ya han sido publicados (Orosa, Pérez, et al., 2022a, 2022b), y el tercero será presentado próximamente en el congreso internacional ISAP 2022 en Costa Rica. Esta sección pretende ser un resumen de éstos, donde se explica la metodología empleada, los resultados principales y las conclusiones más relevantes.

Tabla 4 – Fases del estudio del comportamiento mecánico mediante ensayos triaxiales

Fases	Descripción	Tipo de curado	Ensayos
1.	(a) Desarrollo del Mr con el curado a corto plazo (b) Desarrollo del Mr con el curado a largo plazo	Condiciones ambientales	DTx
2.	Influencia del curado en los parámetros de corte Respuesta a la deformación permanente	Condiciones ambientales, y 3 días a 50 °C 3 días a 50 °C	MTx RLPDTx

Materiales y métodos

Al igual que durante las primeras secciones descritas en este documento, la fase sólida de las CRM estudiadas se compuso totalmente por RAP suministrado por una empresa de la provincia de A Coruña, y la emulsión bituminosa fue una C60B5-REC, de tipo catiónico, con un 60% de ligante residual y rotura lenta. Para las dosificaciones de ligante residual y agua añadida se partió de las Ecuaciones 1 y 2 descritas en la sección 2.1, correspondientes a los métodos de diseño descrito en el PG-4 del 2001 y 2017, mediante las cuales se buscó mantener el contenido óptimo de fluidos. En la Tabla 5 se resumen todas las mezclas consideradas en las distintas fases del estudio triaxial:

Tabla 5 – Nomenclatura y dosificación de las CRM estudiadas

Nomenclatura CRM	BC (%)	EC (%)	AWC (%)
Fase 1.a. Desarrollo a corto plazo del Mr			
1.5B_2.75W			2.75
1.5B_3.75W	1.50	2.50	3.75
2B_1.92W			1.92
2B_3.25W	2.00	3.33	3.25
2.5B_1.08W			1.08
2.5B_1.5W			1.50
2.5B_2W			2.00
2.5B_2.5W	2.50	4.17	2.50
2.5B_2.75W			2.75
2.5B_3W			3.00
2.5B_3.5W			3.50
3B_0.25W			0.25
3B_2.25W	3.00	5.00	2.25
3.5B_1.75W	3.50	5.83	1.75
Fase 1.b. Desarrollo a largo plazo del Mr			
1.5BC	1.50	2.50	3.75
2.0BC	2.00	3.33	3.25
2.5BC	2.50	4.17	2.75
3.0BC	3.00	5.00	2.25
3.5BC	3.50	5.83	1.75
Fase 2. Parámetros de corte y resistencia a la deformación permanente			
2B_3.25W	2.00	3.33	3.25
2.5B_2.75W	2.50	4.17	2.75
3B_2.25W	3.00	5.00	2.25

A partir de los resultados de secciones anteriores, se optó por emplear compactación giratoria, de acuerdo con la norma europea EN 12697-31, tal y como se detalla en el actual PG-4. Para realizar los ensayos triaxiales, las dimensiones de probeta requieren una relación altura-diámetro de 2:1, por lo que se prepararon probetas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, y su curado se realizó en condiciones de sellado parcial (Figura 32), tanto en condiciones ambientales como en estufa a 50 °C, como se resume en la Tabla 4.



Figura 29 – Almacenamiento de las probetas de CRM en condiciones de sellado parcial

Todos los ensayos triaxiales se realizaron utilizando el equipo que se muestra en la Figura 33, disponible en el Laboratorio de Caminos de la ETS de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidade da Coruña. El equipo está compuesto por una prensa neumática vertical encargada de aplicar las cargas axiales; y un sistema de aire comprimido, capaz de aplicar la presión de confinamiento dentro de una cámara sellada desmontable (Figura 33b y 33c). Las deformaciones se midieron mediante transductores de deformación LVDT colocados sobre la tapa superior de la cámara (Figura 33c), realizando el control total de todos los componentes y registro de resultados mediante un ordenador central (Figura 33a).

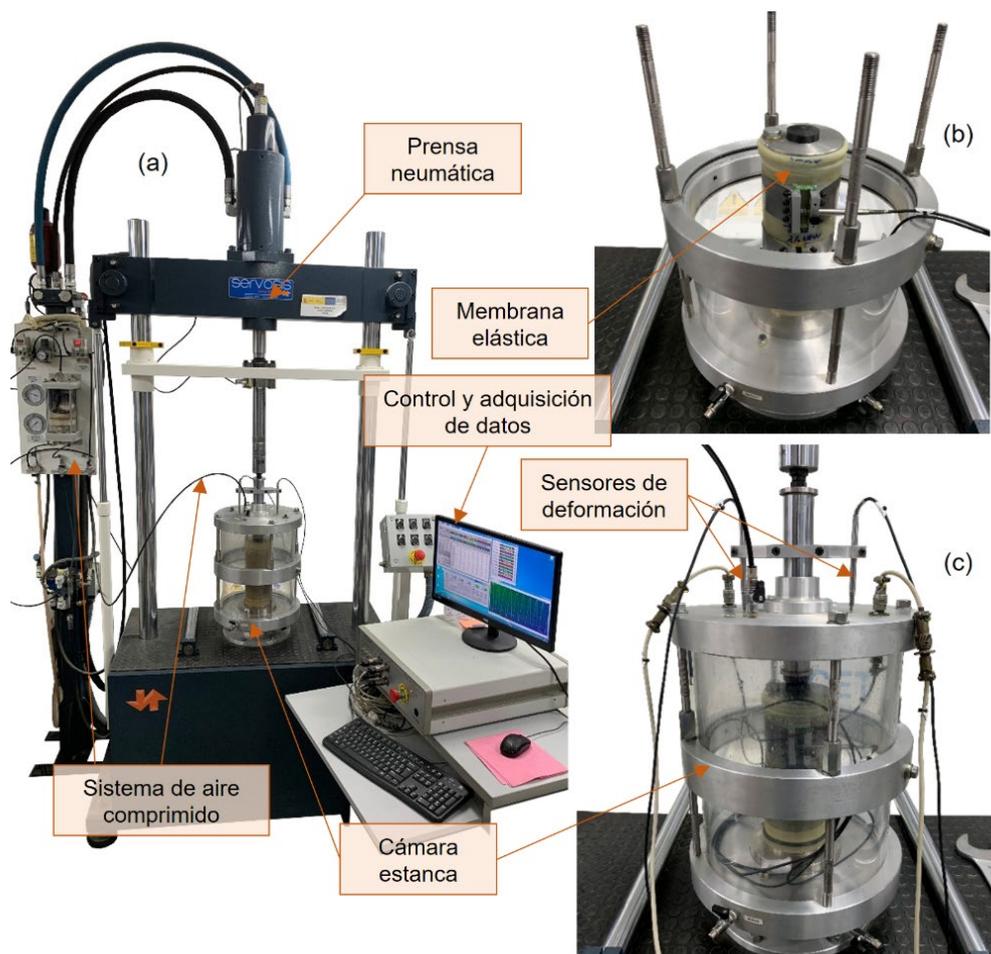


Figura 30 – (a) Equipo empleado para los ensayos triaxiales, (b) cámara triaxial desmontada, con la probeta colocada en su interior, y (c) cámara triaxial cerrada, con la disposición de los LVDT

Fase 1

Para realizar los **ensayos triaxiales dinámicos, DTx**, se aplicaron las secuencias de carga descritas en la norma EN 13286-7 – Parte 7, con PCC creciente y variación sinusoidal de la tensión desviadora, $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ (Tabla 6). El **módulo resiliente dependiente de la tensión, Mr** , se calculó a partir de la σ_d aplicada y a la deformación resiliente (o elástica), ε_r , medida en cada ciclo, como $Mr = \sigma_d / \varepsilon_r$. Al tratarse de un ensayo no destructivo, las probetas de CRM pudieron ser ensayadas repetidas veces a distintas edades de curado en condiciones ambientales (0, 1, 3, 7, 15, 30, 60 y 180, 360, y 540 días), analizando la evolución a corto y largo plazo. Cada probeta de CRM se pesó antes y después de cada ensayo DTx para poder investigar también la pérdida de agua.

Tabla 6 – Secuencias de carga durante ensayo triaxial dinámico de módulo resiliente (EN 13286-7)

Secuencia	Presión de confinamiento, σ_3 (kPa)	Esfuerzo desviador σ_d (kPa)	
		máximo	mínimo
1		30	20
2		50	35
3	20	80	50
4		115	70
5		50	35
6		80	50
7	35	115	70
8		150	90
9		200	120
10		80	50
11		115	70
12	50	150	90
13		200	120
14		280	160
15		115	70
16		150	90
17	70	200	120
18		280	160
19		340	200
20		150	90
21		200	120
22	100	280	160
23		340	200
24		400	240
25		200	120
26		280	160
27	150	340	200
28		400	240
29		475	300

Fase 2

Los **ensayos triaxiales monotónicos, MTx**, se realizaron partiendo de un estado de equilibrio tensional ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$), e incrementando la tensión desviadora, σ_d , hasta el fallo de las probetas. Se seleccionaron cuatro presiones de confinamiento diferentes, σ_3 , (25, 50, 100 y 200 kPa), y se obtuvieron las tensiones principales y desviadoras de fallo ($\sigma_{1,f}$ y $\sigma_{d,f}$). A partir de las tensiones principales mayor y menor de la probeta en el momento del fallo ($\sigma_{1,f}$ y σ_3), se construye el círculo de Mohr-Coulomb, siendo $(\sigma_{1,f} + \sigma_3)/2$ el centro del círculo y $(\sigma_{1,f} - \sigma_3)/2$ el radio (Figura 34). Con al menos tres círculos de Mohr (cada uno de los cuales corresponde a un valor diferente de la tensión de confinamiento), se puede trazar una tangente a estos círculos, conocida como la envolvente de fallo (Figura 34b).

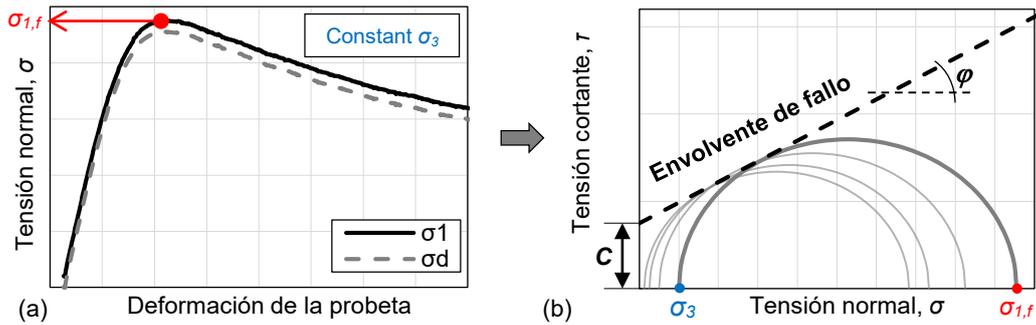


Figura 31 – (a) Ejemplo del resultado de un ensayo MTx; (b) Círculos de Mohr-Coulomb y envolvente de fallo

Cualquier combinación de tensiones normal y cortante por encima de la envolvente de fallo provoca el fallo de la probeta y, por tanto, de la capa de pavimento construida con el CRM estudiado. La ecuación de la línea de fallo de Mohr-Coulomb puede expresarse matemáticamente mediante la Ecuación 3:

$$\tau_{ff} = \tan\varphi \cdot \sigma_{ff} + C \quad \text{Ecuación 3}$$

donde τ_{ff} y σ_{ff} representan las tensiones de cortante y normal cuando se produce el fallo, respectivamente, C representa la cohesión del material, y φ representa el ángulo de fricción interna.

Por otro lado, las tensiones principales y desviadoras máximas resistidas por la probeta en el momento del colapso, $\sigma_{1,f}$ y $\sigma_{d,f}$, son funciones lineales de la presión de confinamiento σ_3 , y sus relaciones se describen en las Ecuaciones 4, 5, y 6:

$$\sigma_{1,f} = A \cdot \sigma_3 + B \quad \text{Ecuación 4}$$

$$A = (1 + \sin\varphi)/(1 - \sin\varphi) \quad \text{Ecuación 5}$$

$$B = (2C \cdot \cos\varphi)/(1 - \sin\varphi) \quad \text{Ecuación 6}$$

A partir de los resultados experimentales de los ensayos triaxiales monotónicos (σ_3 , $\sigma_{1,f}$), fue posible determinar los parámetros A y B mediante una regresión lineal, y posteriormente calcular C y φ para cada CRM. Los ensayos MTx se realizaron sobre CRM sin curar y curadas en estufa durante 3 días a 50 °C; y además, para la mezcla que mostró el mejor comportamiento, se evaluó la evolución a 3 y 7 días de curado en condiciones ambientales.

Para estudiar la **respuesta a la deformación permanente** se siguió el procedimiento descrito en la EN 13286-7 – Parte 8, empleando **ensayos triaxiales de carga repetida, RLPDTx**, con PCC y variación sinusoidal de σ_d (Figura 35a) durante un máximo de 90000 ciclos de carga.

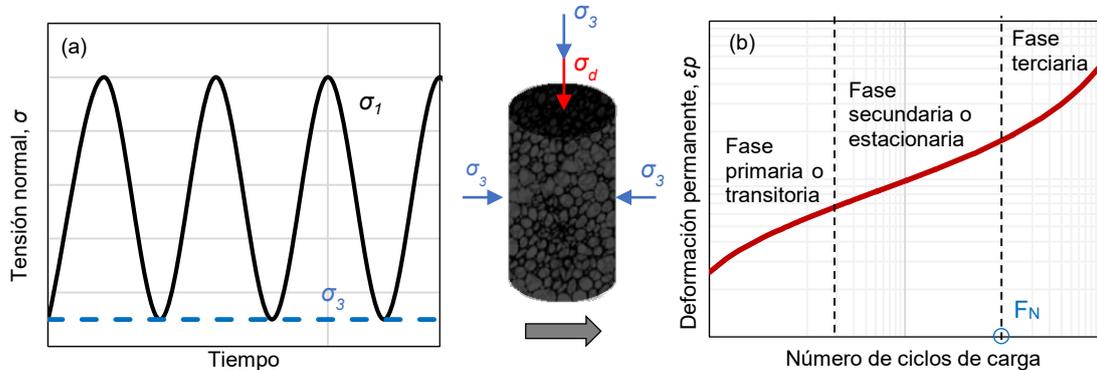


Figura 32 – Esquema de las tensiones aplicadas durante un ensayo RLPDTx, y los resultados obtenidos: (a) variación sinusoidal de la tensión vertical, con PCC; (b) curva de deformación permanente acumulada.

En todos los ensayos RLPDTx se utilizó un PCC de 50 kPa, y sobre cada mezcla se emplearon diferentes esfuerzos desviadores, σ_d , determinados como $SR = \sigma_d / \sigma_{d,f}$, donde $\sigma_{d,f} = \sigma_{1,f} - \sigma_3$, es el esfuerzo desviador de fallo obtenido de las envolventes de fallo derivadas de los ensayos MTx. La Figura 35b ilustra la forma típica de la curva que relaciona el número de ciclos de carga y la deformación permanente acumulada resultante de este tipo de ensayos, donde se aprecia que dicha curva se puede dividir en tres etapas o fases: primaria (o transitoria), secundaria (o de estado estacionario) y terciaria. El número de ciclo en el que comienza la etapa terciaria se conoce como número de flujo o “flow number” (F_N). Se utilizaron seis SR diferentes (20%, 30%, 40%, 50%, 60% y 80%), haciendo posible determinar el SR crítico, a partir del cual se alcanza la etapa terciaria antes de completar los 90000 ciclos de carga en cada mezcla. Una vez alcanzado el flujo terciario, la pendiente de la curva de deformación aumenta rápidamente hasta el fallo de la probeta sin completar el número de ciclos máximo seleccionado. Este tipo de ensayos triaxiales se realizaron sobre las CRM totalmente curadas en estufa a 50 °C durante 3 días.

Tanto los resultados M_r obtenidos en la Fase 1 mediante DTx, como los resultados de deformación permanente, ε_p , obtenidos en la Fase 2 mediante RLPDTx se ajustaron mediante **modelos predictivos** existentes. Debido al comportamiento mecánico de las CRM, dependiente del nivel tensional, se pudieron usar modelos predictivos habitualmente empleados para materiales granulares empleados en los pavimentos de las carreteras. El M_r se ajustó utilizando el modelo de Hicks, o $k-\theta$, el modelo de Uzan y el modelo propuesto por la NCHRP, mientras que para el ajuste de la ε_p se utilizaron el modelo de Paute y el modelo de Huurman, resumidos en la Tabla 7:

Tabla 7 – Modelos predictivos ajustados y sus parámetros

Modelo	Expresión	Parámetros
Hicks et al. (1972), (modelo $K-\theta$)	$M_r = k_1 \cdot \theta^{k_2}$ $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_1 + 2 \cdot \sigma_3$	k_1, k_2, k_3 constantes del material θ , primer invariante de tensiones
Uzan et al. (1992)	$M_r = k_1 \cdot \theta^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$	P_a , presión atmosférica de referencia $\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_d$, tensión octaédrica
NCHRP (2004)	$\frac{M_r}{P_a} = k_1 \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3}$	
Paute et al. (1994)	$\varepsilon_p = \varepsilon_p(100) + f(N) \cdot A$ $f(N) = 1 - \left(\frac{N}{100} \right)^{-B}$ $A = \frac{\frac{q}{p + p^*}}{a - b \cdot \frac{q}{p + p^*}}$	a, b, B , parámetros del material $q = \sigma_3$, tensión desviadora $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$, tensión principal media $p^* = m / s$, donde $q = m \cdot p + s$ N , número de ciclos de carga
Huurman (1997)	$\varepsilon_p = A \cdot \left[\left(\frac{N}{1000} \right)^B \right] + C \cdot \left(e^{D \cdot \frac{N}{1000}} - 1 \right)$ $A = a_1 \cdot (SR)^{a_2}$ $C = c_1 \cdot (SR)^{c_2}$ $B = b_1 \cdot (SR)^{b_2}$ $D = d_1 \cdot (SR)^{d_2}$	$a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2$ parámetros del material $SR = \sigma_d / \sigma_{d,f}$, stress ratio N , número de ciclos de carga

Una vez ajustados estos modelos a partir de los resultados reales de los ensayos triaxiales, es posible implementarlos en programas de simulación numérica para predecir el comportamiento del material dentro de una sección de firme. En la sección siguiente se desarrolla un ejemplo de aplicación de los modelos ajustados para la simulación de la sección de pavimentos rehabilitadas, con CRM como material de la capa base.

Resultados

Fase 1

Paralelamente a la realización de los ensayos DTx, se realizaron medidas de la pérdida de peso de las probetas por evaporación de agua durante el curado y maduración a temperatura ambiente (Figura 36), mostrando unas pérdidas mayores en los primeros días. Después de 7 días, la tasa de pérdida de humedad comienza a disminuir, aunque todavía se registran pérdidas significativas entre los 7 y los 30 días. Tras un mes los pesos son más estables y las pérdidas de peso son menos significativas.

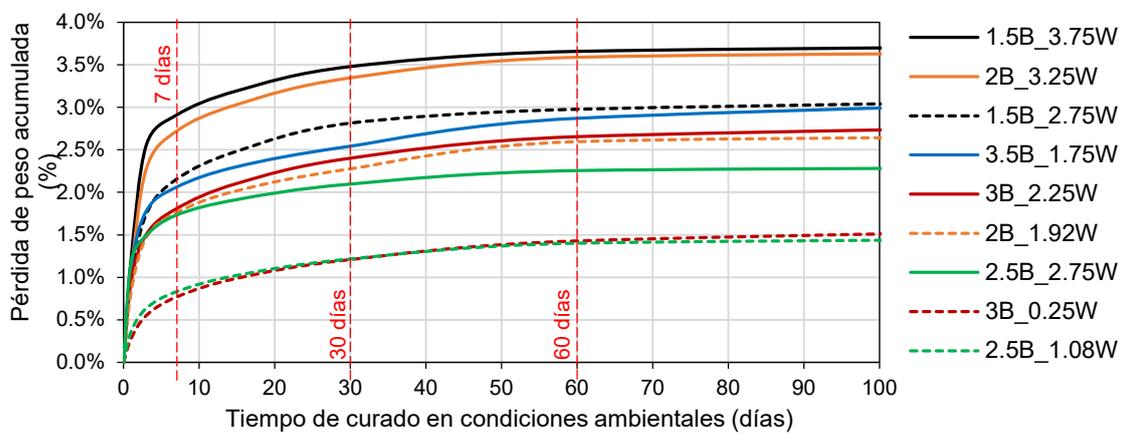


Figura 33 – Pérdida de peso acumulada de las distintas CRM a distintas edades de curado

Los resultados de los ensayos DTx proporcionaron el Mr dependiente de la tensión, pudiendo representar para cada mezcla el Mr en función del primer invariante de tensiones, $\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$ (Figura 37). La norma EN 13286-7 indica, además, que es posible definir un valor característico del Mr para el material a partir de los resultados dependientes de la tensión. Este valor característico de Mr (designado como Mr^*) se define como el Mr correspondiente a los valores de tensión $p = 250$ kPa y $q = 500$ kPa, es decir, para una $\theta = 750$ kPa (Figura 37).

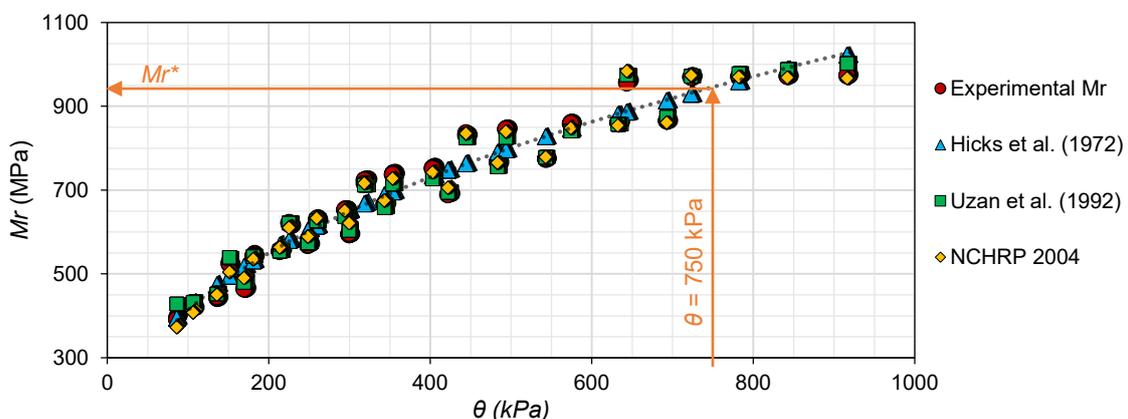


Figura 34 – Resultado experimental de un ensayo DTx y modelos de Mr ajustados

Mientras que los modelos de Uzan y NCHRP son más precisos, la simplicidad del modelo de Hicks (coincidente con la regresión potencial de los resultados experimentales), lo hace especialmente interesante para realizar comparaciones entre distintas CRM o entre tiempos de curado. Así, como ejemplo, en la Figura 38 se representa la evolución del M_r obtenido de los ensayos DTx, desde 0 hasta 60 días de curado, de las CRM con 2.0% y 2.5% de ligante residual, dosificadas de acuerdo con las ecuaciones del PG-4 del 2001 y 2017. Además, la Tabla 8 resume los valores máximo y mínimo de M_r alcanzados durante los ensayos DTx de las todas las CRM, para facilitar su comparación, apoyando las gráficas de la Figura 38.

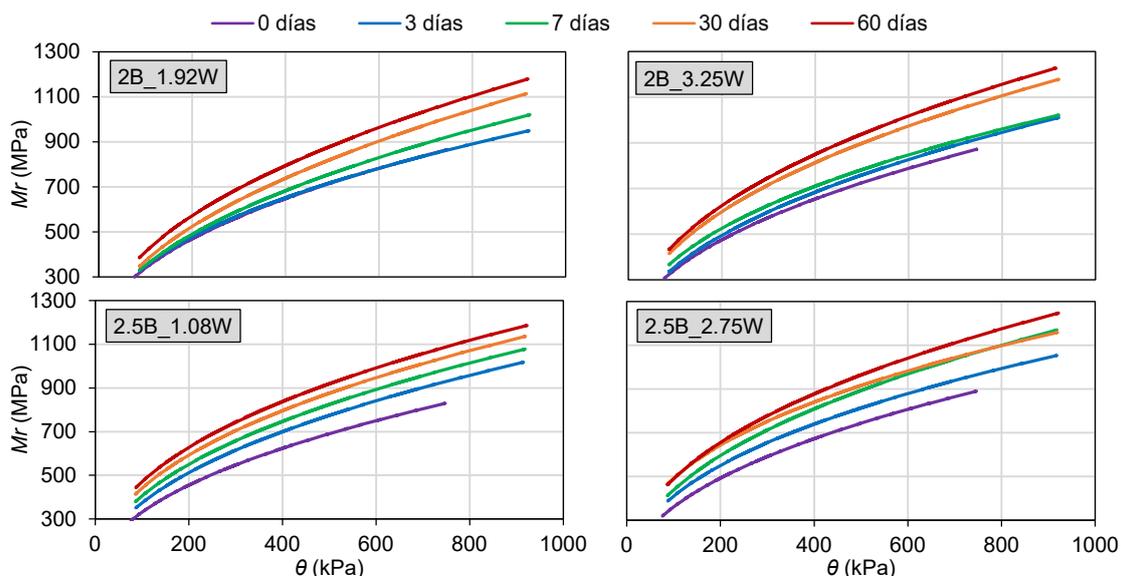


Figura 35 – Evolución del módulo resiliente de CRM con 2.0% y 2.5% de ligante residual y distintos contenidos de agua, tras 0, 3, 7, 30, y 60 días de curado en condiciones ambientales (regresión potencial de los resultados)

Como se pudo ver en la Figura 36, la pérdida de peso más significativa ocurrió durante los primeros días de curado, reduciéndose la velocidad tras 7 días. Esto podría explicar las diferentes evoluciones de rigidez que se registraron, y están representadas en la Figura 38 y Tabla 8, donde puede verse que los mayores incrementos se registraron precisamente hasta el séptimo día, después del cual los incrementos fueron, en general, más lentos.

Tabla 8 – Variación del M_r de las distintas CRM a distintas edades de curado durante los ensayos DTx

Mezclas	Rango de M_r (MPa) a distintas edades de curado...				
	0 d	3 d	7 d	30 d	60 d
1.5B_2.75W	296.23 to 789.99	346.37 to 861.99	365.85 to 908.81	418.33 to 1080.88	443.43 to 1145.73
1.5B_3.75W	284.02 to 805.33	366.05 to 882.71	381.94 to 941.55	423.85 to 1077.58	446.45 to 1173.13
2B_1.92W	307.94 to 830.51	321.51 to 902.86	334.38 to 972.22	355.29 to 1070.40	385.22 to 1140.00
2B_3.25W	295.99 to 830.61	332.87 to 957.60	357.64 to 973.01	418.21 to 1141.90	450.63 to 1200.84
2.5B_1.08W	295.54 to 791.42	346.84 to 974.20	392.03 to 1032.24	429.87 to 1107.10	466.77 to 1163.68
2.5B_1.5W	324.23 to 827.05	374.52 to 948.06	398.65 to 1018.66	439.54 to 1117.96	466.38 to 1202.58
2.5B_2W	354.51 to 882.09	382.14 to 1026.13	433.43 to 1049.93	424.35 to 1145.05	462.55 to 1212.39
2.5B_2.5W	330.81 to 865.54	374.40 to 1028.57	444.33 to 1057.43	472.12 to 1135.88	465.36 to 1202.44
2.5B_2.75W	318.60 to 868.85	367.56 to 1029.59	412.19 to 1117.11	456.89 to 1134.99	472.64 to 1216.72
2.5B_3W	325.38 to 877.68	402.18 to 1007.12	403.12 to 1059.84	440.92 to 1088.72	476.37 to 1212.74
2.5B_3.5W	280.78 to 786.97	342.59 to 911.04	403.98 to 1001.90	482.47 to 1100.15	505.35 to 1281.33
3B_0.25W	298.64 to 804.81	340.52 to 869.00	407.86 to 974.42	463.15 to 1080.26	426.77 to 1060.06
3B_2.25W	303.70 to 792.66	350.41 to 918.52	390.68 to 975.61	487.04 to 1100.83	478.11 to 1187.90
3.5B_1.75W	313.39 to 878.41	374.81 to 917.77	422.64 to 1003.15	481.54 to 1116.10	495.79 to 1168.56

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; mientras que a medida que el curado avanzó, los resultados comenzaron a presentar evoluciones diferentes. En general las mezclas con mayor contenido de ligante mostraron valores de Mr mayores, y con respecto al agua añadida, y se observó que las CRM con contenido demasiado bajo de agua no alcanzaban valores tan altos de Mr tras 30 o 60 días, incluso llegando a reducir dichos valores, como es el caso de la mezcla 3B_0.25W. Considerando la evolución a corto plazo, se concluyó que la mezcla con 2.50% de BC fue la que mostró mejor comportamiento. Por ello, se consideró interesante preparar cinco CRM adicionales con este contenido de ligante, y variando las proporciones de agua añadida, viendo que la mezcla 2.5B_2.75W era la que mostraba mejor evolución de Mr a corto plazo y valores más elevados (Tabla 8).

Se pudo comprobar que efectivamente el incremento de Mr que experimentaban las CRM estuvo íntimamente relacionado con su pérdida de agua a lo largo del curado. Así, registrando dichos incrementos y pérdidas, en la Figura 39 se representa dicha relación para las CRM dosificadas de acuerdo al PG-4

del 2017, correspondiendo cada marcador con una edad de curado (0, 3, 7, 30, 60, 180, 360, y 540 días). Se observó que a las primeras edades de curado la relación fue más lineal, y cuando las pérdidas de agua fueron menores y el peso más estable, el Mr^* continuó creciendo, mostrando una relación exponencial. Mientras que la mezcla con 2.5% de BC mostró la evolución más rápida a corto plazo, a largo plazo aquella con 3.0% de BC siguió aumentando su rigidez, siendo la que mayores valores de Mr^* alcanzó tras 540 días.

Fase 2

Los resultados de los ensayos MTx permitieron obtener las relaciones tensionales $\sigma_3, \sigma_{1,f}$, y los diagramas $p-q$ para los diferentes CRM a los tiempos de curado considerados, pudiendo obtener los círculos de Mohr-Coulomb y las envolventes de fallo, y con ello, los parámetros cohesión (C) y ángulo de fricción interna (φ). Como ejemplo, la Figura 40 presenta los círculos de Mohr-Coulomb de la mezcla curada 2.5B_2.75W con la envolvente de fallo tangente; y en la Tabla 9, un resumen de los parámetros de las distintas CRM a los tiempos de curado considerados.

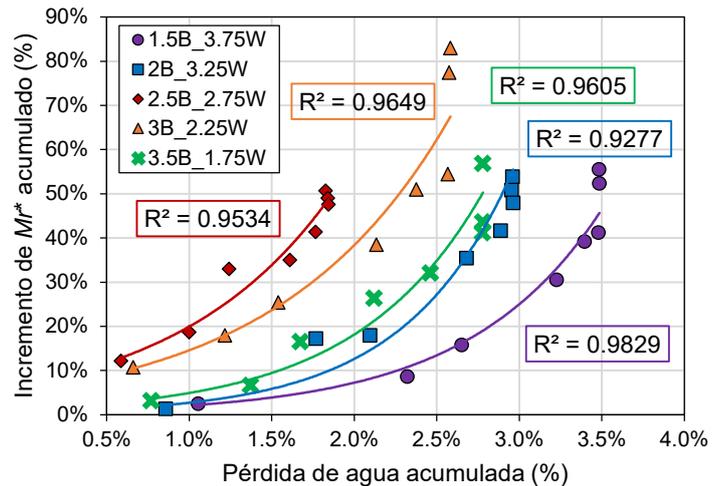


Figura 36 – Relación entre el incremento de módulo resiliente característica y pérdida de agua

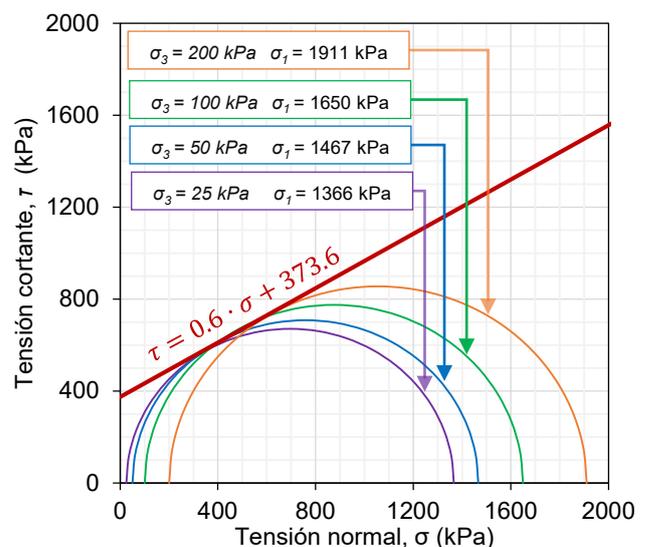


Figura 37 – Círculos de Mohr y línea de fallo de la mezcla 2.5B_2.75W tras 3 días de curado a 50 °C

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 también a la compactación. A esta edad de curado, contenidos creciente de ligante aumentaron ligeramente la cohesión, pero disminuyeron también el ángulo de fricción interna, debido al efecto lubricante entre los

Tabla 9 – Parámetros de corte a distintas edades de curado

Mezcla	Curado	C (kPa)	ϕ (°)
2B_3.25W	0 días	167.07	42.70
	3 días a 50 °C	364.82	40.24
2.5B_2.75W	0 días	176.93	38.38
	3 días	294.77	34.07
	7 días	342.94	32.91
	60 días	365.27	31.49
	3 días a 50 °C	373.60	30.60
3B_2.25W	0 días	187.23	36.58
	3 días a 50 °C	426.52	27.05

áridos. A edades tempranas de curado el material resiste principalmente por fricción interna, gracias a su esqueleto mineral; así, tras el curado podemos ver cómo aumentan significativamente las cohesiones en todos los casos, reduciéndose al mismo tiempo el ángulo de fricción interna. Es interesante ver que, al igual que ocurría con la evolución de los Mr, los mayores incrementos de cohesión vuelven a ocurrir durante los primeros 7 días de curado (Tabla 9).



Figura 38 – Probetas tras ser sometidas a ensayos MTx. Inclínación del plano de rotura a aproximadamente 60 °

Los ensayos RLPDx se realizaron con una PCC, $\sigma_3 = 50$ kPa; y lo 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 42a muestra las deformaciones permanentes acumuladas (ϵ_p) de la mezcla curada 2.5B_2.75W a diferentes SRs frente al número de ciclos de carga (N). Además, las tasas de deformación permanente acumulada (ϵ_p / N) también se trazaron frente a la deformación permanente acumulada (ϵ_p), para analizar el grado de estabilización de la deformación (Figura 42b).

Las Figuras 42a y 42b combinadas permitieron definir el SR crítico para cada CRM (Tabla 10), 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, y la deformación permanente muestra un incremento acelerado con el número de ciclos, no se estabiliza y se produce el fallo. En el caso de la mezcla 2.5B_2.75W, la Figura 42b muestra que las tasas de aumento de la deformación permanente para los SR de 20% y 30% tienden a reducirse, mostrando una forma bastante vertical, mientras que para los SR de 40% y superiores se observa un cambio de dirección en la curva hacia la derecha, indicando que la deformación permanente no se estabiliza, dando comienzo a la etapa terciaria de la deformación. Por el mismo motivo, también para SR del 40% y superiores las curvas de la Figura 42a no muestran

estabilización de la deformación permanente, sino que antes de completar los 90000 ciclos existe un punto de inflexión y la deformación permanente crece de manera más rápida.

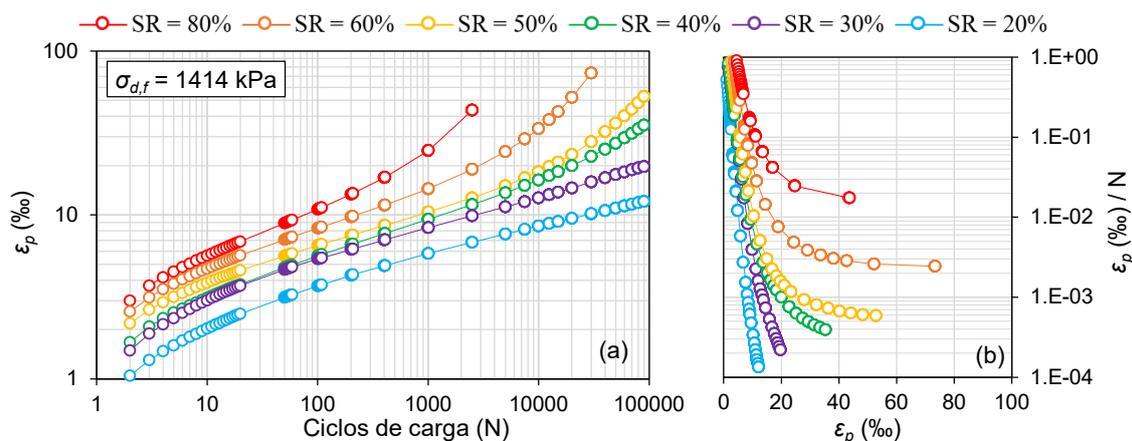


Figura 39 – Resultados de los ensaos RLPDTx de la CRM 2.5B_2.75W, tras 3 días de curado a 50 °C, a los diferentes SR considerados: (a) deformación permanente acumulada frente a número de ciclos de carga; (b) tasa de deformación permanente acumulada frente a la deformación permanente acumulada

Para cada una de las CRM estudiadas, la Tabla 10 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 90000 ciclos. Cuando existen niveles de tensión por encima de la SR crítico en la capa material CRM, se considera que se produce formación de roderas de la sección del pavimento, y por lo tanto el fallo. Se observó que, para el aumento de las BC, los valores de SR crítica y $\sigma_{d,a}$ tendieron a disminuir en consonancia con la disminución de la tensión desviadora de fallo.

Tabla 10 – Esfuerzo principal de fallo ($\sigma_{1,f}$) para $\sigma_3 = 50$ kPa, stress ratios críticos, y esfuerzo desviador aplicado ($\sigma_{d,a}$) a partir del cual se produce fluencia antes de 90000 ciclos de carga

Mezclas	σ_3 (kPa)	$\sigma_{1,f}$ (kPa)	$\sigma_{d,f}$ (kPa)	SR crítico (%)	$\sigma_{d,a}$ (kPa)
2B_3.25W	50	1927	1877	30	563
2.5B_2.75W	50	1464	1414	30	424
3B_2.25W	50	1527	1477	20	295

Todas las probetas tuvieron unas propiedades volumétricas similares, por lo que las diferencias en los resultados se debieron principalmente a las proporciones de ligante residual (BC). Un mayor BC proporciona una mayor flexibilidad mientras que empeora el comportamiento ante la deformación permanente (mezcla 3B_2.25W), conclusión compartida con investigadores como Jenkins et al. (2007). Por otro lado, un BC bajo proporciona una mayor fricción interna, pero también ocasiona aparición de fluencia más temprana en casos de alto SR (mezcla 2B_3.25W). Por ello, la CRM con 2.50% BC 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.

En cuanto a los modelos predictivos, los parámetros ajustados y una discusión en detalle de se ajuste se encuentra en el artículo publicado Orosa et al. (2022b) "Evaluation of the shear and permanent deformation properties of cold in-place recycled mixtures with bitumen emulsion using triaxial tests". *Construction and Building Materials*, 328, 127054. Se pudo comprobar que el término exponencial del modelo de Huerman proporcionó una mejor predicción de la deformación permanente, sobre todo una vez alcanzada la etapa terciaria, como se puede apreciar en la Figura 43, donde se comparan los valores medidos con los resultados del modelo.

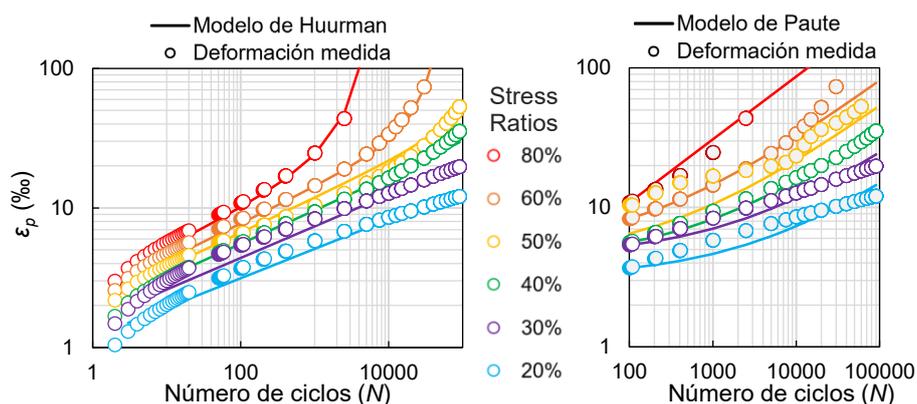


Figura 40 – Representación de los modelos predictivos de deformación permanente de Hurrman y Paute junto a la deformación medida de la CRM 2.5B_2.75W

Conclusiones principales

- Se demostró el comportamiento elástico no lineal de las CRM, con una dependencia significativa de las tensiones principales σ_1 (vertical) y, en mayor medida, σ_3 (confinamiento).
- Los ensayos DTx de Mr mostraron resultados similares a 0 días de curado debido a que el ligante todavía no aporta totalmente su papel cohesivo, y resisten principalmente debido a su esqueleto mineral.
- El aumento de la rigidez y cohesión estuvo estrechamente relacionado con la pérdida de humedad durante el curado. Se registraron mayores aumentos de Mr en los primeros 7 días, cuando la tasa de evaporación era mayor; mientras que pasados los 7 días y especialmente tras 30 días, cuando la evaporación se estabilizó, el aumento de Mr fue más lento. Se encontró una relación bastante lineal a corto plazo; mientras que, a más largo plazo, cuando la evaporación fue menor el Mr siguió aumentando, mostrando una relación exponencial.
- La mezcla con un 2.50% de BC, preparada de acuerdo con el PG-4 español actual, fue la CRM que mostró la mejor evolución de Mr a corto plazo. Sin embargo, la CRM con 3.00% BC mostró un aumento de rigidez más prolongado en el tiempo de Mr , y a largo plazo, tras 12 o 18 meses, mostró los valores más altos.
- Las envolventes de fallo de Moh-Coulomb y los parámetros de cortante fueron similares para las CRM sin curar, siendo el efecto del ligante más relevante en la medida que avanzó el curado, llegando a duplicarse la cohesión. Mayores contenidos de ligante mostraron cohesiones ligeramente superiores en las CRM, sin embargo, un contenido demasiado elevado fue perjudicial para el ángulo de fricción interna, actuando como lubricante entre los áridos.
- Respecto a la respuesta a la deformación permanente, las CRM con 2,00% y 2,50% de BC obtuvieron un resultado de SR crítico del 30%, mientras que un mayor contenido de ligante fue perjudicial para la respuesta a la deformación permanente, y la mezcla con 3,00% de BC presentó un SR crítico del 20%. Cuando se supera un nivel de tensión superior a este límite en la capa del CIRM, se considera que la sección del pavimento falla por aparición de roderas. La CRM con 2.50% BC y 2.75% AWC necesitó un mayor número de ciclos de carga para alcanzar valores de deformación permanente excesivos, siendo la que mejor comportamiento mostró.

5. Simulación numérica de secciones de firme rehabilitadas mediante reciclado en frío in situ con emulsión

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 CRM y su vulnerabilidad a corto plazo ha provocado que el uso del CIR no sea tan extendido como sería deseable dadas sus ventajas. Por ejemplo, el PG-4 español restringe su uso a carreteras con categorías de tráfico pesado T4, T3, T2, T1 (solo como capa de base) o arcenes; y, además, se especifican ciertos rangos de espesor limitados. Sin embargo, otros factores como el resto de las capas del pavimento (como la subbase existente) no se tienen en cuenta y juegan un papel fundamental.

Siguiendo un enfoque similar al adoptado por Pérez et al. (2020, 2016), se realizaron simulaciones numéricas de secciones de pavimento rehabilitadas, suponiendo el empleo de la técnica CIR, asumiendo la presencia del material reciclado estudiado como capa base, permitiendo optimizar el diseño del pavimento mediante la predicción de su respuesta en función de diferentes parámetros. 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 anteriormente ajustados. La presente sección pretende ser una síntesis de dicha investigación, publicada en Orosa et al. (2022) "Numerical simulation of the stiffness evolution with curing of pavement sections rehabilitated using cold in-place recycling technology" *Construction and Building Materials*, 335, 127487.

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 CRM (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 obtenidos sobre el nivel tensional permitieron predecir las deformaciones permanentes esperadas en la sección de firme.

Secciones de firme y materiales

Se supusieron como punto de partida dos secciones de firme frecuentemente usadas en la red de carreteras españolas, contempladas en el catálogo de la norma 6.1 IC, una con base semirrígida (de suelocemento, CTM) y otra con base flexible (de zahorra, UGM), descritas en la Figura 44. Se asumió el fresado de las capas bituminosas deterioradas y su rehabilitación mediante CIR. El espesor inicial de la base de CRM fue de 120 mm, con una capa de rodadura de HMA de 50 mm, cumpliendo con las especificaciones del PG-4. Adicionalmente, se analizó el efecto de variar el espesor de la capa base (80, 160 y 200 mm), escenarios con y sin capa de rodadura, y cuatro tiempos diferentes de curado del CRM (0, 3, 7 y 60 días). La configuración de carga para la simulación numérica fue un solo eje de 130 kN con dos neumáticos dobles (65 kN en cada juego de neumáticos), y se aplicaron dos cargas circulares homogéneas $p = 900$ kPa con 107.2 mm de radio separadas por 343 mm de centro a centro (Figura 44).

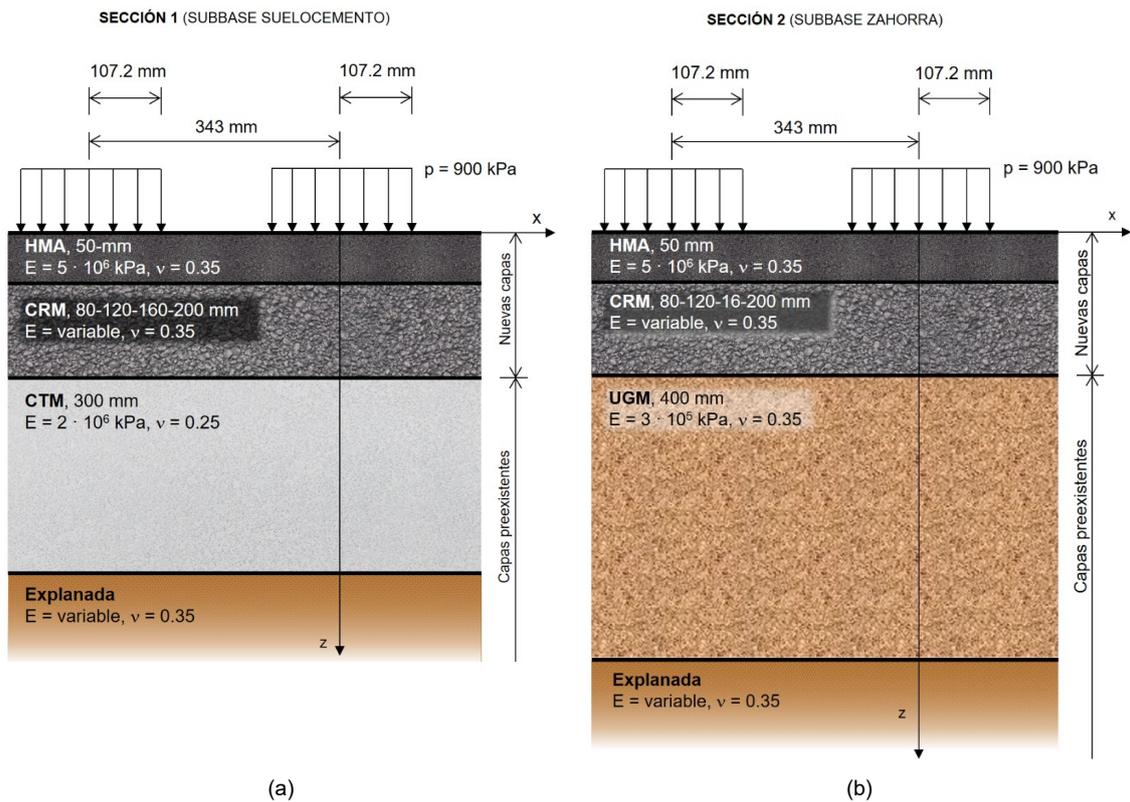


Figura 41 – Secciones de firme rehabilitadas mediante CIR: (a) Sección 1, sobre capa preexistente de suelocemento (subbase semirrígida), y (b) Sección 2, sobre capa de zahorra preexistente (subbase flexible)

El modelo se desarrolló utilizando el software FLAC3D, el cual emplea un cálculo específico empleando el método de diferencias finitas para la simulación del comportamiento de los materiales. Para ello, las capas de las secciones del pavimento se dividieron en elementos poliédricos formando una malla 3D (Figura 45), cuyo comportamiento sigue una ley específica de tensión-deformación, respondiendo a las cargas aplicadas y a las condiciones de contorno establecidas.

Para simular el comportamiento mecánico no lineal del CRM se emplearon los modelos predictivos ajustados a partir de los ensayos triaxiales; mientras que, para simplificar los cálculos, se supuso un comportamiento mecánico elástico y lineal de las capas de rodadura (HMA) y subbases (CTM y UGM), y comportamiento no lineal del material de la explanada. En las tablas se resumen los parámetros ajustados de los modelos predictivos de comportamiento empleados para el CRM, correspondientes a la CRM con 2.5%BC y 2.75%AWC.

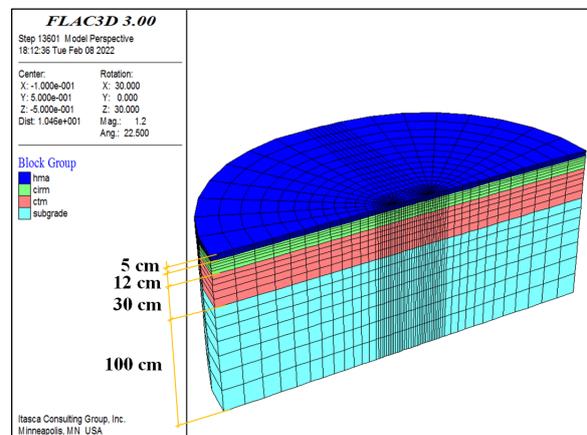


Figura 42 – Malla de cálculo usada para la sección 1 (120 mm de reciclado)

Tabla 11 – Parámetros ajustados de los modelos de M_r , y parámetros de cortante a distintas edades de curado

Tiempo de curado	0 días			3 días			7 días			60 días		
Modelos de predicción del módulo resiliente												
	k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3	k_1	k_2	k_3
M1–Hicks	45.483	0.450		57.782	0.425		57.108	0.443		70.546	0.421	
M2–Uzan	37.785	0.670	-0.232	43.824	0.735	-0.304	46.808	0.676	-0.231	60.133	0.611	-0.188
M3–NCHRP	3.779	0.636	-0.607	4.222	0.704	-0.640	4.471	0.649	-0.472	4.966	0.577	-0.355
Parámetros de cortante												
C (kPa)	176.93			294.77			342.94			365.27		
φ (°)	38.38			34.07			32.91			31.49		

Los SR obtenidos en la base de CRM se introdujeron en el modelo de deformación permanente de Huurman (Tabla 7), cuyos parámetros ajustados se indican en la Tabla 12, y a partir del criterio de fallo de Mohr-Coulomb, es posible expresar el SR como una función de los parámetros de cortante, C y φ (Tabla 11), y de las tensiones principales mayor y menor, σ_1 y σ_3 , obtenidas del modelo numérico como:

$$SR = \frac{\sigma_d}{\sigma_{d,f}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_3 \left[\tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) - 1 \right] + 2C \cdot \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)} \quad \text{Ecuación 7}$$

Tabla 12 – Parámetros ajustados del modelo de Huurman de predicción de deformación permanente

a_1	a_2	b_1	b_2	c_1	c_2	d_1	d_2
0.022310	0.917860	0.283333	0.185589	0.010606	1.126797	2.758488	7.279381

Resultados

Respuesta del CRM empleando los tres modelos de comportamiento resiliente

En primer lugar, se realizó una comparación entre las distintas predicciones de los módulos resilientes sobre la sección con una base de 120 mm, a diferentes tiempos de curado, utilizando los tres modelos de predicción considerados. A modo de ejemplo, la Figura 46 muestra la variación de M_r con la profundidad del firme, considerando ambos tipos de subbase (CTM o UGM, respectivamente), y escenarios con y sin capa de rodadura HMA (denotados como H o 0 en la leyenda de la figura, respectivamente), a 7 días de curado del material reciclado. Además, también se compararon las predicciones de deflexiones máximas, deformaciones y stress ratios, y se incluyen en el artículo completo (Orosa et al., 2022).

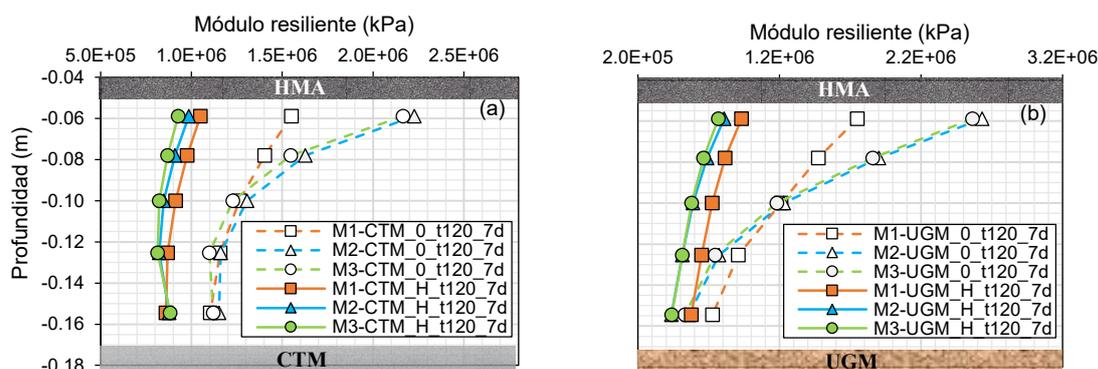


Figura 43 – Variación del módulo resiliente en capa de CRM de 120 mm tras 7 días de curado

Como resultado de la comparación de los modelos predictivos se observó que el modelo de Hicks (M1) tendía a producir resultados de rigidez mayores, por lo que las deformaciones obtenidas eran del lado de la inseguridad. Los modelos de Uzan (M2) y NCHRP (M3) fueron muy similares, por lo que se optó por emplear el modelo NCHRP por ser el más avanzado y actualizado.

El curado del CRM produjo un aumento de Mr , mientras que la presencia de la capa de rodadura de HMA disminuyó el estado tensional de la base de CRM, disminuyendo en consecuencia los valores de Mr , así como su variación con la profundidad, mostrando valores más estables. Sin embargo, los diferentes tipos de subbase mostraron diferentes tendencias en cuanto a la variación de Mr con diferentes espesores de la base CIR. Este interesante resultado puede observarse en la Figura 46, donde se representa la variación de Mr con la profundidad para secciones con HMA (H), ambos tipos de subbase (CTM en la Figura 46a, o UGM en la Figura 46b), y diferentes espesores de la base de CRM (t80, t120, t160 y t200) y tiempos de curado (0d, 3d, 7d y 60d).

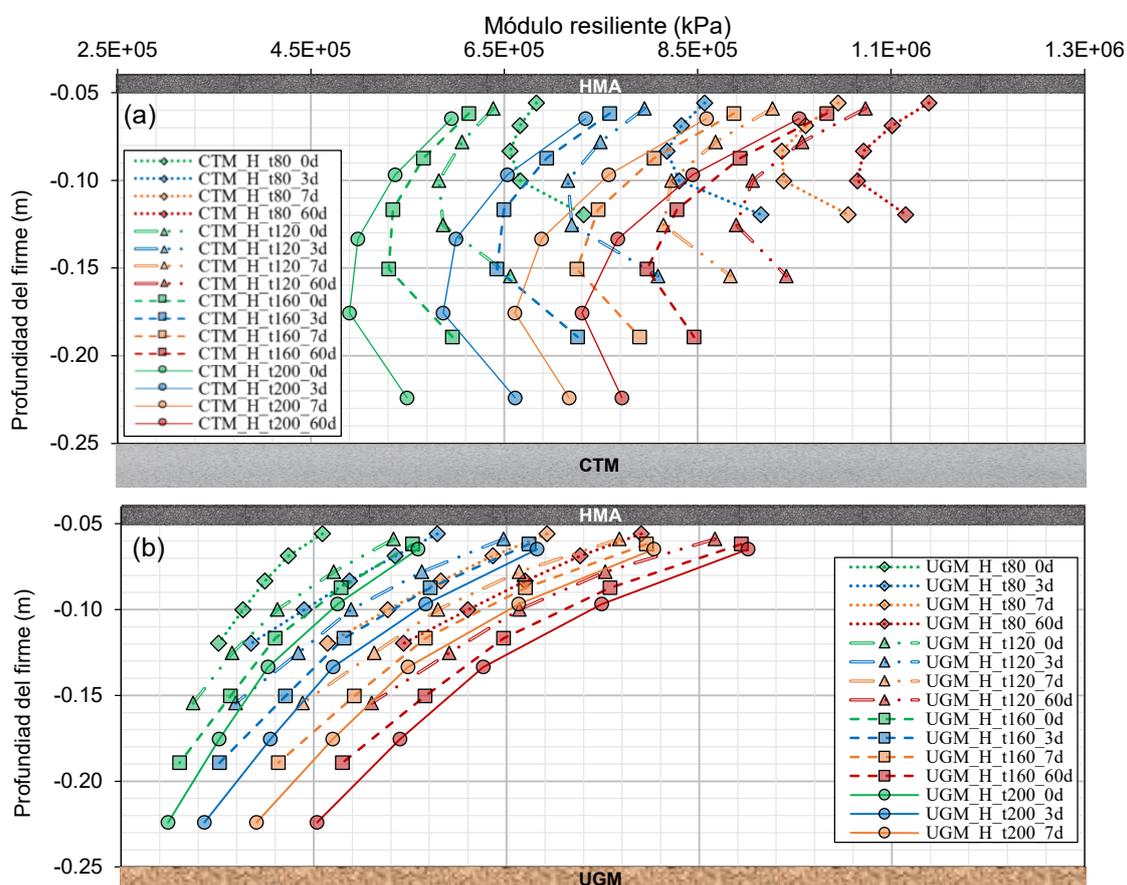


Figura 44 – Variación del módulo resiliente en secciones con HMA, con diferentes espesores de CRM y tiempos de curado, usando el modelo de predicción NCHRP (M3): (a) subbase CTM; (b) subbase UGM

Las secciones con subbase semirrígida (Figura 46a), con y sin HMA, mostraron un aumento de Mr con la disminución del espesor de la base de CRM, mientras que ocurrió lo contrario con una subbase flexible (Figura 46b), reduciéndose el Mr con la disminución del espesor de la base.

Influencia del tiempo de curado, tipo de subbase y espesor de la base en los SR pico de la CRM

A partir de los resultados de tensiones obtenidos en las simulaciones, la Ecuación 7 permitió conocer los stress ratios (SR), el cual es un parámetro clave, relacionado con la aparición de deformaciones permanentes. La Figura 47 muestra la variación de los picos de SR en el CRM con el tiempo de curado y los diferentes espesores de base, indicando además con una zona sombreada en verde los SR inferiores al 40% (límite habitualmente considerado para evitar aparición temprana de deformaciones permanentes). Los resultados se muestran con ambos tipos de subbase (UGM o CTM), para los escenarios con HMA y sin HMA (H o 0).

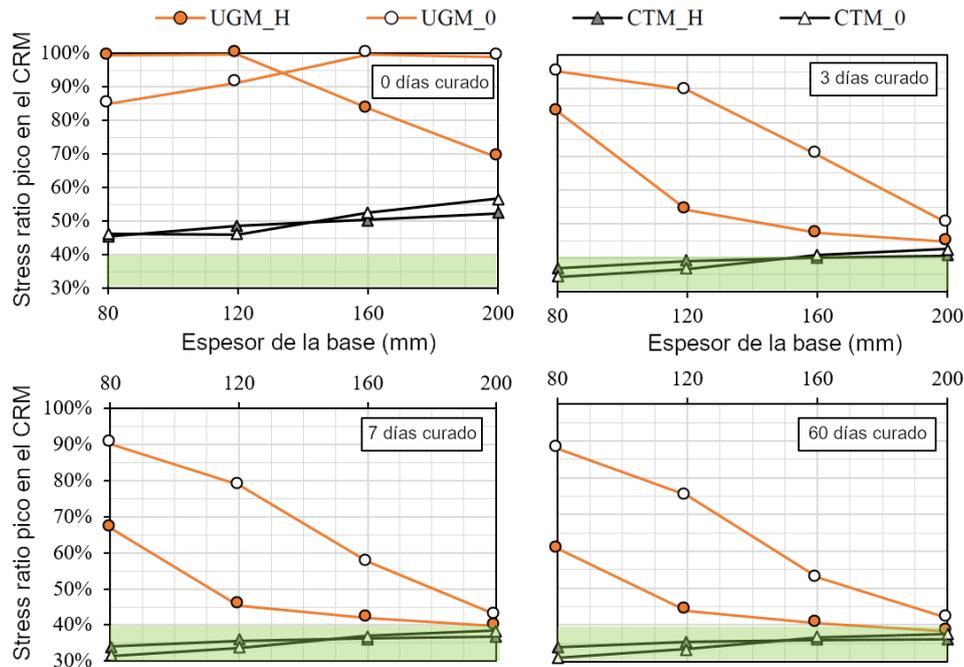


Figura 45 – Variación de los stress ratios en la capa de CRM para distintos espesores de la base, tipos de subbase, y tiempos de curado

La tendencia vuelve a ser opuesta en función del tipo de subbase, ya que mientras que el aumento del espesor de la base de CRM reduce el SR pico en el caso de subbase de UGM, ésta aumenta ligeramente el SR pico en el caso de subbase de CTM (Figura 48). Con subbase de CTM, los SR máximos son menores y más estables debido a la elevada rigidez del CTM (en comparación con el CRM y el UGM), encargándose de soportar la mayor parte de las tensiones y reduciéndolas en el CRM. Uno de los motivos de esta diferencia en los SR en cada caso son las tensiones horizontales que aparecen en el material reciclado de la base. Mientras que cuando existe una subbase semirrígida las tensiones horizontales resultaron principalmente de compresión, en el caso de subbase flexible aparecieron tracciones, como se observa en la Figura 49, siendo las principales responsables del aumento importante del SR. En el caso de sección CIR con subbase CTM (semirrígida), el nivel tensional de la base aumentará cuando aumenta su espesor, ya que aumentará su papel estructural en la sección y se llevará más esfuerzos que se llevaba inicialmente la subbase. Sin embargo, en el caso de sección con subbase UGM (flexible), el material reciclado es más rígido y por lo tanto necesitaremos más espesor para aumentar la capacidad portante de la sección, reducir su SR y tratar de evitar aparición temprana de roderas.

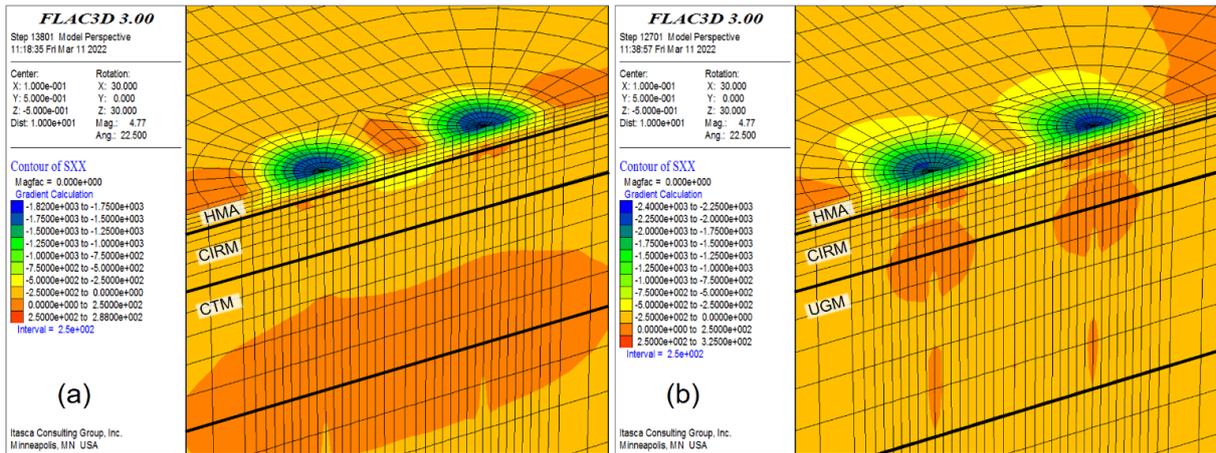


Figura 46 – Tensiones horizontales tras 7 d de curado de la base de CRM con espesor de 120 mm, escenario con capa de rodadura HMA y (a) subbase CTM, y (b) subbase de UGM

Por último, en cuanto a la evolución de los SR en el CRM con el tiempo de curado, se observó una tendencia general a su reducción, siendo más significativa durante los primeros 7 días; y entre 7 y 60 días la reducción fue más lenta. Con esto, se concluyó que 7 días de curado podrían ser un tiempo suficiente para que la CRM desarrolle unas resistencias y rigidez representativas de sus propiedades a más largo plazo, y es un momento adecuado para la ejecución de la capa de rodadura.

Influencia del tipo de subbase y espesor de la base en la respuesta a la deformación permanente

Introduciendo los SR pico en el modelo ajustado de predicción de deformación permanente fue posible estimar las deformaciones esperadas en cada una de las secciones estudiadas, en función del tipo de subbase y espesor de reciclado (Figura 49). Siguiendo la línea de los resultados anteriores, cuando la subbase es flexible (UGM), el aumento del espesor de la base condujo a un mejor comportamiento de la sección, alcanzando los límites de deformación permanente para un mayor número de ciclos de carga. Sin embargo, ocurre lo contrario cuando la subbase es semirrígida.

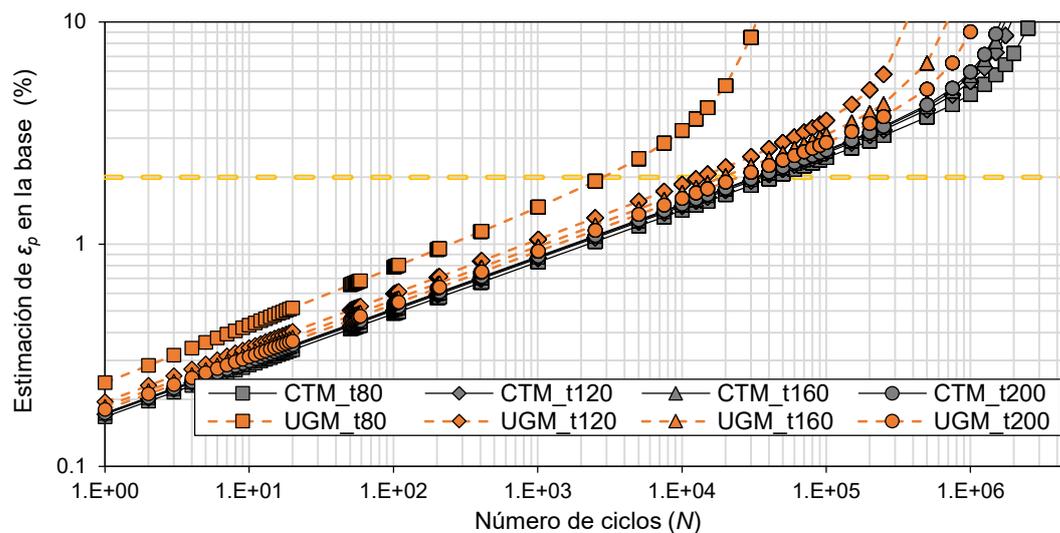


Figura 47 – Predicción de deformación permanente de las secciones CIR para ambos tipos de subbase y distintos espesores de CRM

Conclusiones principales

- El módulo resiliente del CRM disminuyó con la profundidad, al igual que las tensiones, debido a la respuesta mecánica no lineal, dependiente del nivel tensional, de este material. La inclusión de la capa de rodadura y presencia de subbase semirrígida produjo variaciones de M_r más estables.
- El aumento del espesor de la base de CRM fue beneficioso en las secciones con subbase flexible, mostrando menores deflexiones y deformaciones, y menores SR pico. Sin embargo, con una subbase semirrígida el efecto fue el contrario.
- La evolución de la respuesta mecánica del CRM en términos de reducción de la SR se hace más estable después de 7 días de curado, y aunque sigue desarrollando sus resistencias, el ritmo es menor. Se considera que 7 días de curado, en las condiciones del estudio, son un tiempo suficiente antes de colocar la capa de rodadura.
- Cuando la subbase es flexible, la contribución mecánica del CRM de base es esencial, y la respuesta de la sección es más sensible a las variaciones de su espesor. Cuando los espesores de la subbase son bajos el CRM se sobrecarga, mientras que los aumentos de espesor proporcionan más rigidez y mejoran la respuesta de la sección. Sin embargo, cuando la subbase es semirrígida, la elevada rigidez de la subbase hace que el espesor de la base de CRM no tenga gran influencia en la resistencia de la sección. En este caso, el aumento del espesor de la base hace que el CRM aumente los niveles tensionales, reduciendo la durabilidad de la sección.

En general, toda carretera que requiera una rehabilitación es candidata a ser sometida a un CIR; sin embargo, hay que tener en cuenta que las capas previamente existentes, que continuarán en el pavimento (como subbase y explanada), tienen una influencia fundamental. En el caso de una subbase semirrígida, la base de CRM proporciona un buen comportamiento, añadiendo flexibilidad, y es posible aumentar el espesor del material reciclado sin que se produzca un deterioro importante en el comportamiento, debido al elevado aporte resistente de la subbase. En el caso de una subbase flexible, el CRM es el material que aporta mayor rigidez y es necesario un espesor mínimo para que pueda desarrollar una rigidez suficiente. Independientemente del espesor, cuando se plantea un CIR sobre una subbase flexible, debe hacerse a sabiendas de que la aparición de roderas ocurrirá para un número menor de ciclos de carga que con una subbase semirrígida.

CONCLUSIONES GENERALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La tónica general, a día de hoy, en el sector de la construcción, y particularmente en el sector de la carretera, apunta hacia la **búsqueda de técnicas alternativas más sostenibles, respetuosas con el medio ambiente, y en sintonía con la economía circular**. Las mezclas bituminosas recicladas en frío con emulsión bituminosa, y particularmente su aplicación *in situ*, son una opción muy prometedora y a la que hoy en día se está dedicando un mayor esfuerzo por desarrollar, y aumentar su implementación.

- Para el diseño en laboratorio de CRM, se considera fundamental la elección de un **método de compactación que simule las propiedades volumétricas en campo** lo mejor posible. Se comprobó que la **compactación giratoria** era la más adecuada y versátil.

- Los requerimientos de resistencia mínima deben adecuarse al nivel de compactación especificado.
- **La granulometría del RAP es clave en el encaje inicial entre partículas y en las propiedades volumétricas** presentadas por las CRM. Una energía de compactación concreta no siempre garantiza la obtención de las mismas propiedades volumétricas.
- Las CRM mostraron un **comportamiento mecánico viscoelástico**, pero también muy **dependiente del nivel de tensión** al que se ven sometidos, especialmente en las primeras etapas tras la fabricación. Se considera que su estudio mediante **ensayos triaxiales** es una **herramienta fundamental para caracterizar totalmente este material**, y mientras que ensayos sencillos como ITS son una herramienta rápida para realizar un diseño preliminar, se recomienda una caracterización más en detalle mediante ensayos triaxiales con distintos niveles de confinamiento. Este enfoque para el diseño ya está contemplado en manual sudafricano TG-2 para BSM.
- Las **simulaciones numéricas** demostraron ser una **herramienta potente de apoyo en el diseño**, permitiendo implementar los modelos de comportamiento no lineales del material reciclado, y evaluar la influencia del tiempo de curado o espesor de capa en la respuesta de la sección.
- Como aplicación fundamental de los resultados a los métodos de diseño, particularmente al actual PG-4, se recomienda una adecuación de los valores mínimos indicados de ITS a un material reciclado en frío, y al nivel de compactación indicado. Además, tras una investigación mayor en la línea del trabajo presentado, se propone incluir como variable en el diseño el tipo y características del material de las capas inferiores (subbase), ya que la presencia de material más rígido y con prestaciones mecánicas adecuadas puede permitir incrementar las tasas de material reciclado empleadas en la sección rehabilitada.

Como continuación de este estudio, una tarea de mayor interés es la investigación del empleo de **rejuvenecedores** en mezclas recicladas en frío. Su empleo ha sido estudiado principalmente en mezclas recicladas en caliente, pero su uso en CRM no está totalmente desarrollado.

Además, buscando una mejora de las propiedades mecánicas y reducción del tiempo de curado necesario, se considera interesante explorar el uso de fillers activos en CRM. Adicionalmente a fillers conocidos como cemento o cal hidratada, otros materiales que presenten actividad química en contacto con la emulsión bituminosa o el agua podrían ser candidatos a mejorar el comportamiento de CRM.

Finalmente, en vista del comportamiento mecánico de las CRM, se considera interesante a la hora de su implementación en simulación numérica, el desarrollo de modelos de comportamiento dependientes de temperatura, frecuencia, nivel de tensión y tiempo curado, los cuales pueden ser derivados de resultados de ensayos triaxiales a distintas temperaturas y frecuencias a distintas edades de las CRM.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación ha sido financiada por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del Proyecto BIA2016-80317-R, asociado a una Ayuda para la Formación de Personal Investigador (FPI) BES-2017-079633, con dos ayudas para la realización de estancias breves en la École de Technologie Supérieure de Montreal, Quebec (Beca Inditex-UDC 2020) y otra en la Lyles School of Civil Engineering, en Purdue University, EEUU (Ayuda FPI, BES-2017-079633). Con respecto a los materiales usados, el RAP fue generosamente donado por la empresa ARIAS INFRAESTRUCTURAS, S.A., y la emulsión bituminosa por la empresa ECOASFALT, S.A., sin coste alguno.

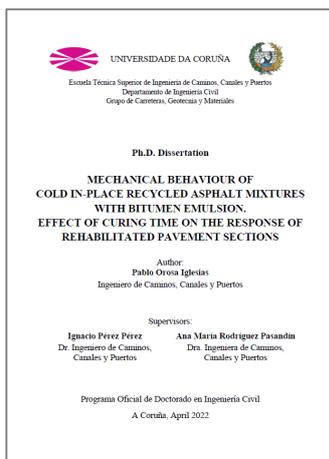
REFERENCIAS

- Asphalt Academy. (2020). *Technical Guideline (TG2) : Bitumen Stabilised Materials Southern African Bitumen Association (Sabita)* Pretoria, Issue August.
- Asphalt Recycling & Reclaiming Association (ARRA). (2001). *Basic Asphalt Recycling Manual*.
- Asphalt Recycling & Reclaiming Association (ARRA). (2016). *Recommended Mix Design Guidelines For Cold Recycling Using Bituminous Recycling Agents - CR201* (Vol. 21401, Issue 410).
- Casillas, S., & Braham, A. (2021). Quantifying effects of laboratory curing conditions on workability, compactability, and cohesion gain of cold in-place recycling. *Road Materials and Pavement Design*, 22(10), 2329–2351.
- Ebels, L.-J. (2008). *Characterisation of Material Properties and Behaviour of Cold Bituminous Mixtures for Road Pavements* (Issue March). Stellenbosch University.
- European Asphalt Pavement Association (EAPA). (2014). *Asphalt the 100% recyclable construction product*.
- European Asphalt Pavement Association (EAPA). (2020). *Asphalt in figures 2020*.
- European Commission. (2019a). *Circular Economy Action Plan. For a cleaner and more competitive Europe*.
- European Commission. (2019b). *The European Green Deal. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the committee of the Regions*.
- Fedriço, W., Peres Núñez, W., Pinheiro Fernandes, D., Marin Malabarba, L., Augusto Pereira Ceratti, J., & Antônio Teixeira Brito, L. (2021). Effects of RAP residual asphalt binder type, content and ageing on the mechanical behaviour of cold recycled cement-treated mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 22(6), 1389–1406.
- Ferrotti, G., Grilli, A., Mignini, C., & Graziani, A. (2020). Comparing the field and laboratory curing behaviour of cold recycled asphalt mixtures for binder courses. *Materials*, 13(21), 1–19.
- Filho, W. U., Gutiérrez Klinsky, L. M., Motta, R., & Bariani Bernucci, L. L. (2020). Cold Recycled Asphalt Mixture using 100% RAP with Emulsified Asphalt-Recycling Agent as a New Pavement Base Course. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020.
- Gómez-Mejide, B., & Pérez, I. (2015). Nonlinear elastic behavior of bitumen emulsion-stabilized materials with C&D waste aggregates. *Construction and Building Materials*, 98, 853–863.
- Graziani, A., Iafelice, C., Raschia, S., Perraton, D., & Carter, A. (2018). A procedure for characterizing the curing process of cold recycled bitumen emulsion mixtures. *Construction and Building Materials*, 173(1), 754–762.
- Jain, S., & Singh, B. (2021). Cold mix asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124378.
- Jenkins, K. J., Long, F. M., & Ebels, L.-J. (2007). Foamed bitumen mixes = Shear performance? *International Journal of Pavement Engineering*, 8(2), 85–98.

- Jin, D., Ge, D., Chen, S., Che, T., Liu, H., Malburg, L., & You, Z. (2021). Cold in-place recycling asphalt mixtures: Laboratory performance and preliminary m-e design analysis. *Materials*, 14(8).
- Kim, Y., Asce, A. M., Im, S., Asce, S. M., David, H. ", & Lee, ". (2011). *Impacts of Curing Time and Moisture Content on Engineering Properties of Cold In-Place Recycling Mixtures Using Foamed or Emulsified Asphalt*.
- Liu, P., Xu, H., Wang, D., Wang, C., Schulze, C., & Oeser, M. (2018). Comparison of mechanical responses of asphalt mixtures manufactured by different compaction methods. *Construction and Building Materials*, 162, 765–780.
- Meknaci, L., Graziani, A., Mignini, C., Henni, A. D., & Miljković, M. (2021). Influence of bitumen emulsion on the curing behaviour of standardised cold bitumen emulsion mortars. *Road Materials and Pavement Design*, 1–17.
- Ministerio de Fomento. (2017). *PG-4. Orden Circular 40/2017 sobre reciclado de firmes y pavimentos bituminosos*.
- Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana (MITMA). (2001). *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras (PG-4). Orden Circular 8/2001 sobre reciclado de firmes*.
- Müller, M., Krick, T., & Blohmke, J. (2021). Putting the construction sector at the core of the climate change debate. *Deloitte*.
- Offenbacher, D., Saidi, A., Ali, A., Mehta, Y., Decarlo, C. J., & Lein, W. (2021). Economic and Environmental Cost Analysis of Cold In-Place Recycling. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(3), 04020496.
- Orosa, P. (2022). *Mechanical behaviour of cold in-place recycled asphalt mixtures with bitumen emulsion. Effect of curing time on the response of rehabilitated pavement sections*. Universidade da Coruña.
- Orosa, P., Medina, L., Fernández-Ruiz, J., Pérez, I., & Pasandín, A. R. (2022). Numerical simulation of the stiffness evolution with curing of pavement sections rehabilitated using cold in-place recycling technology. *Construction and Building Materials*, 335(127487).
- Orosa, P., Orozco, G., Carret, J.-C., Carter, A., Pérez, I., & Pasandín, A. R. (2022). Compactability and mechanical properties of cold recycled mixes prepared with different nominal maximum sizes of RAP. *Construction and Building Materials*, 339(127689).
- Orosa, P., Pasandín, A. R., & Pérez, I. (2020). Assessment of two laboratory design methods for CIR mixtures with bitumen emulsion based on static and gyratory compaction. *Construction and Building Materials*, 265(120667).
- Orosa, P., Pasandín, A. R., & Pérez, I. (2021). Compaction and volumetric analysis of cold in-place recycled asphalt mixtures prepared using gyratory, static, and impact procedures. *Construction and Building Materials*, 296(123620).
- Orosa, P., Pérez, I., & Pasandín, A. R. (2022a). Short-term resilient behaviour and its evolution with curing in cold in-place recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 323, 126559.
- Orosa, P., Pérez, I., & Pasandín, A. R. (2022b). Evaluation of the shear and permanent deformation properties of cold in-place recycled mixtures with bitumen emulsion using triaxial tests. *Construction and Building Materials*, 328, 127054.
- Pérez, I., Medina, L., & del Val, M. A. (2016). Nonlinear elasto-plastic performance prediction of materials stabilized with bitumen emulsion in rural road pavements. *Advances in Engineering Software*, 91, 69–79.
- Pérez, I., Medina, L., & Del Val, M. A. (2016). Nonlinear elasto-plastic performance prediction of materials stabilized with bitumen emulsion in rural road pavements. *Advances in Engineering Software*, 91, 69–79.
- Pérez, I., Medina, L., Gómez-Meijide, B., Costa, P. A., & Cardoso, A. S. (2020). Numerical simulation of bitumen emulsion-stabilised base course mixtures with C&D waste aggregates considering nonlinear elastic behaviour. *Construction and Building Materials*, 249, 118696.

- Perraton, D., Tebaldi, G., Dave, E., Bilodeau, F., Giacomello, G., Grilli, A., Graziani, A., Bocci, M., Grenfell, J., Muraya, P., Pasetto, M., Kuna, K., Apeageyi, A., Lo Presti, D., Airey, G., Jenkins, K. J., Hajj, E., Hugener, M., & Marsac, P. (2016). Tests Campaign Analysis to Evaluate the Capability of Fragmentation Test to Characterize Recycled Asphalt Pavement (RAP) Material. In *RILEM Bookseries* (Vol. 11, Issue October, pp. 965–976).
- Raschia, S., Graziani, A., Carter, A., & Perraton, D. (2019). Influence of RAP source and nominal maximum size on volumetric and physical properties of cement-bitumen treated materials. *Transportation Research Board (TRB) 98th Annual Meeting*.
- Raschia, S., Mignini, C., Graziani, A., Carter, A., Perraton, D., & Vaillancourt, M. (2019). Effect of gradation on volumetric and mechanical properties of cold recycled mixtures (CRM). *Road Materials and Pavement Design*, 20(sup2), S740–S754.
- Raschia, S., Taher, ;, Moghaddam, B., Perraton, ; Daniel, Baaj, H., Carter, A., & Graziani, A. (2021). *Effect of RAP Source on Compactability and Behavior of Cold-Recycled Mixtures in the Small Strain Domain*.
- Santagata, E., Chiappinelli, G., Riviera, P. P., & Baglieri, O. (2010). Triaxial Testing for the Short Term Evaluation of Cold-Recycled Bituminous Mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 11(1), 123–147.
- Tebaldi, G., Dave, E., Cannone Falchetto, A., Hugener, M., Perraton, D., Grilli, A., Lo Presti, D., Pasetto, M., Loizos, A., Jenkins, K., Apeageyi, A., Grenfell, J., & Bocci, M. (2019). Recommendation of RILEM TC237-SIB on fragmentation test for recycled asphalt. *Materials and Structures*, 52(4), 82.
- Tebaldi, G., Dave, E. V., Marsac, P., Muraya, P., Hugener, M., Pasetto, M., Graziani, A., Grilli, A., Bocci, M., Marradi, A., Wendling, L., Gaudefroy, V., Jenkins, K., Loizos, A., & Canestrari, F. (2014). Synthesis of standards and procedures for specimen preparation and in-field evaluation of cold-recycled asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 15(2), 272–299.
- United Nations. (2015). *Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development* (United Nations (ed.); A/RES/70/1).
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2021). *Climate Change Indicators in the United States*. <https://www.epa.gov/climate-indicators>
- Van De Ven, M. F. C., Jenkins, K. J., Voskuilen, J. L. M., & Van Den Beemt, R. (2007). Development of (half-) warm foamed bitumen mixes: State of the art. *International Journal of Pavement Engineering*, 8(2), 163–175.
- Williams, B. A., Willis, J. R., & Shacat, J. (2019). *Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage 2019* (National Asphalt Pavement Association (NAPA) (ed.)).
- Wirtgen GmbH. (2012). Wirtgen Cold Recycling Technology. *Wirtgen Cold Recycling Technology*, 367.
- WRI (World Resources Institute). (2021). *Climate Watch historical GHG emissions*. Accessed March 2021. https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end_year=2018&start_year=1990
- Xiao, F., Yao, S., Wang, J., Li, X., & Amirkhanian, S. (2018). A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 180, 579–604.
- Yang, W., Ouyang, J., Meng, Y., Han, B., & Sha, Y. (2021). Effect of curing and compaction on volumetric and mechanical properties of cold-recycled mixture with asphalt emulsion under different cement contents. *Construction and Building Materials*, 297.

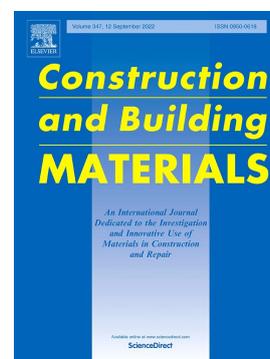
DIVULGACIÓN DE RESULTADOS, RECONOCIMIENTOS Y DISTINCIONES



La investigación descrita en esta memoria ha dado lugar a la **tesis doctoral** del autor, y lleva por título “Mechanical behaviour of cold in place recycled asphalt mixtures with bitumen emulsion. Effect of curing time on the response of rehabilitated pavement sections”, defendida el pasado 17 de junio de 2022.

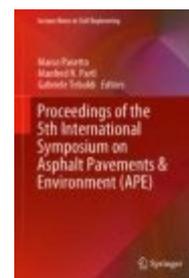
Los resultados obtenidos han dado lugar a **7 artículos científicos**; 6 de los cuales están publicados en **una revista del primer cuartil (Q1) en el Journal Citations Report (JCR)**, los cuales han recibido, hasta el momento, 22 citas, según datos de Google Académico. A continuación, se listan los 7 artículos mencionados, de más antiguo a más nuevo:

- Orosa, P., Pasandín, A. R., & Pérez, I. (2020). Assessment of two laboratory design methods for CIR mixtures with bitumen emulsion based on static and gyratory compaction. *Construction and Building Materials*, 265, 120667. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120667>
- Orosa, P., Pasandín, A. R., & Pérez, I. (2021). Compaction and volumetric analysis of cold in-place recycled asphalt mixtures prepared using gyratory, static, and impact procedures. *Construction and Building Materials*, 296, 123620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123620>
- Orosa, P., Pérez, I., & Pasandín, A. R. (2022). Short-term resilient behaviour and its evolution with curing in cold in-place recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 323, 126559. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126559>
- Orosa, P., Pérez, I., & Pasandín, A. R. (2022). Evaluation of the shear and permanent deformation properties of cold in-place recycled mixtures with bitumen emulsion using triaxial tests. *Construction and Building Materials*, 328, 127054. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127054>
- 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*, 335, 127487. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127487>
- 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*, 339, 127689. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127689>
- Orosa, P., Pérez, I., Pasandín, A. R., & Pérez-Barge, N. Evolutionary resilient response of cold in-place recycled mixtures during the curing period. Aceptado para presentación oral en el *International Symposium of Asphalt Pavements 2022*, en Costa Rica el 25-27 de octubre de 2022.



Además, los resultados se han presentado en **congresos nacionales e internacionales**:

- 5th International Symposium on Asphalt Pavements Environment.
 - 11, 12 y 13 de septiembre de 2019, en Padua, Italia.
 - Ponencia: "Evaluation of two laboratory-based design methods for CIR mixtures"
 - Autores: Orosa, P., Pasandín, A. R., Pérez, I.
- Semana de la Carretera 2019 – INNOVACARRETERA 2019
 - 29, 30 y 31 de octubre de 2019, en Santiago de Compostela.
 - Ponencia: "Estudio comparativo de dos métodos de diseño para mezclas asfálticas recicladas in situ con emulsión bituminosa y su impacto en el dimensionamiento de firmes: investigación del período de maduración". Incluida en el proyecto CMECREC.
 - Autores: Orosa, P., Pasandín, A. R., Pérez, I.
- CAMPUS FIT 2020
 - 24, 25 y 26 de junio de 2020, Organizado por el Foro de Ingeniería del Transporte (Valencia).
 - Ponencia: "Comparación de dos métodos de diseño de mezclas asfálticas recicladas in situ con emulsión bituminosa"
 - Autores: Orosa, P., Pasandín, A. R., Pérez, I.
- InterCILA 2021. Ibero-Latin American Asphalt Congress, CILA
 - 23, 24 y de noviembre de 2021, Guadalajara (México)
 - Presentación del proyecto CMECREC - Comportamiento mecánico de mezclas asfálticas recicladas "in situ" con emulsión bituminosa y su impacto en el dimensionamiento de firmes: investigación del período de maduración.
- International Symposium of Asphalt Pavements (ISAP) 2022
 - 25, 26 y 27 de octubre de 2022, Costa Rica (ponencia aceptada)
 - Ponencia: "Evolutionary resilient response of cold in-place recycled mixtures during the curing period"
 - Autores: Orosa, P., Pérez, I., Pasandín, A. R., & Pérez-Barge, N.



Reconocimientos y méritos adicionales:

- Durante el evento INNOVACARRETERA 2019, en Santiago de Compostela, el proyecto de investigación presentado por el autor recibió el premio al "Mejor proyecto de I+D+i".
- La investigación de este trabajo se ha complementado con dos estancias predoctorales realizadas por el solicitante (Pablo Orosa Iglesias) en universidades extranjeras:
 - Financiado por la Beca INDITEX 2020 para realización de estancias predoctorales, se realizó una estancia en la École de Technologie Supérieure de Montreal, Université du Québec, del 1 de marzo al 16 de junio de 2021.
 - Financiado por la beca para la Formación de Personal Investigador (FPI, BES-2017-079633), del Ministerio de Economía y Competitividad, se realizó una segunda estancia de investigación en la Lyles School of Civil Engineering, en la Purdue University, en West Lafayette (Indiana, EEUU).
- Tesis doctoral calificada como sobresaliente Cum Laude, y mención de doctorado internacional.

