

# METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA MEZCLAS RECICLADAS CON EMULSIÓN Y 100% DE RAP

Guillermo Flores<sup>1</sup>, Juan Gallego<sup>2</sup>, Lucía Miranda<sup>3</sup>, Miguel Martín Cano<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, guillermo.flores1091@gmail.com

<sup>2</sup> Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, juan.gallego@upm.es

<sup>3</sup> Repsol, Madrid, España, marialucia.miranda@repsol.com

<sup>4</sup> SACYR, Madrid, España, mcano@sacyr.com

## Resumen

Actualmente no existe consenso sobre la metodología más adecuada para el diseño de mezclas recicladas en frío con emulsión, debido a su complejidad. Por lo tanto, el diseño generalmente se basa en el cumplimiento de uno o más parámetros mecánicos o volumétricos establecidos en las regulaciones de carreteras, lo cual no garantiza la optimización de la mezcla. El presente trabajo propone una metodología de diseño para mezclas recicladas en frío con emulsión, en la que se evalúan 6 parámetros: contenido de huecos, Resistencia a tracción indirecta, sensibilidad al agua, ahuellamiento, módulo de rigidez y vida a fatiga. Se establecieron índices de rendimiento para evaluar los valores obtenidos de las pruebas según los gráficos de comportamiento con un valor máximo de 1. Estas gráficas evalúan los resultados de las pruebas, considerando como valor máximo los resultados más favorables para el rendimiento óptimo de la mezcla. Finalmente, para el análisis de las mezclas, los autores proponen un índice global de desempeño (IGD) que muestra el promedio de los 6 parámetros medidos. El resultado es un número que representa la fórmula de trabajo, que es sensible a los cambios en los valores de las propiedades y que se obtiene mediante una metodología sistemática. Por lo tanto, la elección se basa en criterios técnicos y de acuerdo con el IGD.

**Palabras clave:** Mezclas asfálticas recicladas en frío, RAP, emulsión, metodología de diseño.

## 1 Introducción

En la búsqueda de alternativas que reducen la explotación de recursos naturales como los agregados minerales y el ligante se ha llegado al uso de productos o materiales de desecho con características adecuadas para la composición de mezclas de asfalto, entre ellas el uso de pavimento asfáltico recuperado (RAP) [1]. El uso del RAP es relevante para salvaguardar los recursos naturales y a su vez reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> [2] y generando considerables beneficios ambientales al transformar los materiales de desecho en un recurso valioso [3]. El RAP se considera un recurso valioso debido a la alta calidad de sus agregados y su ligante asfáltico [4].

El pavimento asfáltico es 100% reciclable y puede usarse para reparar carreteras antiguas o para la construcción de nuevas [5]. Puede reciclarse utilizando diferentes métodos: el reciclaje en caliente en la planta, el reciclaje en caliente in situ, el reciclaje en frío en planta y el reciclado en frío in situ [6]. La emulsión asfáltica y el asfalto espumado son los materiales más utilizados en el reciclaje en frío de pavimentos asfálticos. Las emulsiones permiten reciclar el pavimento viejo a temperaturas más bajas en la planta o in situ [4].

A pesar de los beneficios económicos y ambientales, las autoridades viales tienden a limitar el uso de RAP en mezclas asfálticas debido a la incertidumbre sobre el desempeño en el campo [6]. El contenido de RAP suele estar limitado por factores como la variabilidad de RAP y los problemas asociados con la manejabilidad y la compactación [7], o también debido a las dificultades para mezclar el RAP con los materiales vírgenes sin aumentar las temperaturas [5]. Otro factor es el exceso de

agregados en la fracción fina causada por el proceso de molienda o el grado de envejecimiento del ligante, que puede afectar el rendimiento final de la mezcla de asfalto [1]. La característica más crucial del RAP que afecta las propiedades y el rendimiento de las mezclas recicladas es el envejecimiento del ligante [8]. Las mezclas asfálticas con un alto contenido de RAP (contenido de RAP entre 25 y 100%) pueden presentar algunos aspectos críticos como son mayor rigidez y fragilidad del ligante, problemas de sensibilidad al agua y rendimiento a largo plazo, [3]. Algunos investigadores han expresado su preocupación por la falla prematura debido a la fatiga y al agrietamiento a baja temperatura [9].

La influencia de la incorporación de cualquier material marginal en la resistencia de la mezcla asfáltica debe aclararse para garantizar un rendimiento adecuado del pavimento [10]. Una de las principales limitaciones es que el RAP es la falta de homogeneidad causada por la variabilidad del pavimento del campo, que combina RAP de varias fuentes, diferentes edades del pavimento, estados de daño y molienda de múltiples capas [11].

La industria del asfalto ha estado bajo presión para reducir sus emisiones. Esto se puede lograr, por un lado, al disminuir las temperaturas de mezcla y colocación de las mezclas asfálticas [5]. Una reducción en la temperatura de fabricación de 20 ° C significa un ahorro de energía del 25% y una reducción en la emisión de gases de efecto invernadero entre 20 y 35% [2]. Los contenidos de RAP tradicionales varían de 20 a 30% en los Estados Unidos, mientras que, en algunos países europeos, el contenido máximo permitido de RAP es del 50% [7]. En la mayoría de los países europeos, la cantidad de asfalto recuperado y la producción de asfalto que contiene RAP continúa creciendo regularmente [5].

Se ha llevado a cabo una extensa investigación para evaluar los efectos de la inclusión de RAP en mezclas asfálticas [12]. Sin embargo, el rendimiento de campo real de los pavimentos de asfalto que incorporan RAP rara vez se documenta [13].

Para mejorar las propiedades de los pavimentos de asfalto con RAP se ha probado con algunos estabilizantes o aditivos, como el cemento Portland. El cemento Portland parece prometedor en relación con la mejora de las propiedades mecánicas del pavimento asfáltico reciclado en frío. Sin embargo, podría ser difícil de predecir las propiedades finales [4].

En cuanto a las metodologías de diseño, los diagramas de mezcla y las fórmulas de predicción se utilizan comúnmente para seleccionar el ligante apropiado [3]. En muchas ocasiones, el diseño se basa en el método Marshall modificado [14]. En otras, la optimización de la densidad aparente o el contenido de huecos han sido los parámetros principales [15]. Un método más extenso para el diseño de la mezcla se informa con las siguientes fases [16].

1. Optimización del contenido de fluido por densidad aparente y huecos en mezcla.
2. Optimización del contenido de cemento a través de ITS y módulo de rigidez.
3. Optimización del contenido de emulsión basado en ITS y módulo de rigidez.

Otro estudio, que utilizó asfalto espumado [17] se basó en las funciones de deseabilidad en las que las propiedades finales de la mezcla se evalúan con criterios estandarizados y establecidos.

Definitivamente, no hay consenso sobre las metodologías más adecuadas para diseñar mezclas recicladas en frío con emulsión. Debido a la complejidad de este tipo de mezclas, se requiere un estudio más amplio que considere todas estas propiedades de manera integrada, así como el valor de cada una de ellas en el comportamiento final de la mezcla; De esta manera se lograría una evaluación más realista para cada una de las dosificaciones estudiadas.

Por lo tanto, en el presente trabajo, se evalúa una serie de posibles dosificaciones de una mezcla y, en base a los resultados de las pruebas de laboratorio, se propone una metodología que los integra a todos en un solo valor. Estos son entonces comparables y nos permite considerar el mejor resultado. El objetivo del estudio no es solo evaluar la mezcla producida en el laboratorio, sino también establecer una metodología que se pueda aplicar a otras mezclas recicladas en frío con emulsión, y así avanzar con este tipo de tecnología.

## 2 Materiales

Se produjo una mezcla fría con emulsión utilizando un 100% de RAP, un porcentaje fijo de agua de pre-enuelva del 3% en peso del RAP, tres porcentajes de emulsión E (2,3 y 4%), así como 3 porcentajes de cemento (0% 1 y 2%). El RAP utilizado consiste en un material fresado en el sitio. La granulometría elegida para la mezcla se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Huso granulométrico RE2

<b>Tamiz (mm)</b>	<b>20</b>	<b>12.5</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>0.5</b>	<b>0.25</b>	<b>0.063</b>
Curva adoptada (RE2)	100.0	75.0	63.0	44.0	27.0	10.2	6.6	2.7
Mínimo	80.0	62.0	49.0	31.0	19.0	2.0	0.0	0.0
Máximo	100.0	89.0	77.0	58.0	42.0	20.0	10.0	3.0

Se usó el huso RE2 porque la granulometría obtenida en el sitio a través del fresado del pavimento existente se ajusta dentro de los límites establecidos por este huso y se requirió muy poca recomposición granulométrica. Esta gradación es recomendada por las especificaciones técnicas generales españolas para trabajos de conservación de carreteras PG4 [18]. De la misma forma, se extrajo el asfalto del RAP para conocer su grado de envejecimiento. Los resultados se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades del RAP y del asfalto recuperado

<b>Propiedades</b>	<b>Norma</b>	<b>Valores</b>
Densidad máxima	EN 12697-5	2,443 g/cm <sup>3</sup>
% Asfalto en RAP	EN 12697-1	4.89%
Punto de reblandecimiento	EN 1427	80.3°C
Penetración	EN 1426	11x10 <sup>-1</sup> mm

Se usó una emulsión asfáltica catiónica para aplicaciones de reciclaje en frío, con un contenido residual de betún del 60%, rotura lenta (B5), producida con agentes rejuvenecedores (C60B5REC REJUV).

## 3 Metodología

El objetivo de la investigación fue seleccionar la dosis que ofrece el mejor rendimiento de servicio. Teniendo esto en cuenta, en el laboratorio se fabricaron una serie de muestras con diferentes porcentajes de cemento y emulsión. Los ensayos realizados fueron: sensibilidad al agua (EN 12697-12), ahuellamiento (EN 12697-22), módulo de rigidez (EN 12697-26) y fatiga diametral (EN 12697-24). Para la sensibilidad al agua, el módulo de rigidez y la prueba de fatiga diametral, se fabricaron muestras cilíndricas de 100 mm de diámetro utilizando el compactador giratorio con un ángulo de rotación interno de 0,82, una velocidad de 30 rpm, una presión máxima de 600 KPa y 100 giros. En el caso del ahuellamiento, las muestras se compactaron con un compactador de rodillos para obtener el 99% de las compactadas con un compactador giratorio. La nomenclatura de una mezcla consiste en una letra "C" seguida del contenido de cemento y una letra "E" seguida del contenido de la emulsión. Por ejemplo, C0E2 representa una mezcla con 0% de cemento y 2% de emulsión.

### 3.1 Fabricación de las probetas

Las muestras cilíndricas se fabricaron a temperatura ambiente (20-25°C) siguiendo los pasos que se muestran en la Figura 1.



Figura 1. Proceso de fabricación de las probetas cilíndricas

Con respecto al proceso de curado, los especímenes se cubrieron con una película plástica que dejó la cara superior expuesta (Fig. 2) durante 7 días a temperatura ambiente y luego se retiró la cubierta de plástico y se colocó en el horno a 50 ° C hasta peso constante, lo cual se logró después de 3 días de estar en el horno para las probetas cilíndricas y en 7 días para las probetas de ahuellamiento..



Figura 2. Curado de las probetas cilíndricas. a) Con cubierta, b) en el horno

### 3.2 Ensayos Mecánicos

Para esta prueba, se fabricaron 8 muestras para cada dosis, 4 que se mantuvieron en condiciones secas y 4 después del acondicionamiento en húmedo. Los resultados obtenidos fueron la resistencia a la tracción indirecta (ITS) y la relación de resistencia a la tracción indirecta (ITSR), que se muestran en las Figuras 3 y 4.

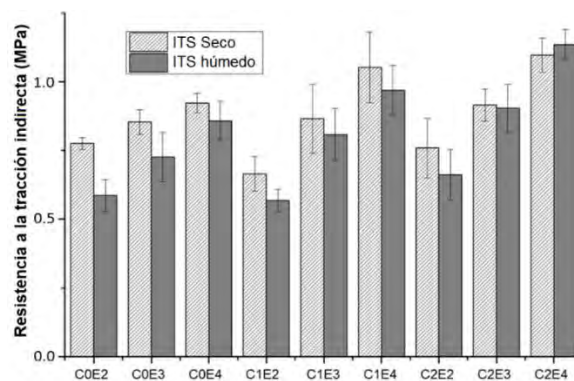


Figura 3. Resistencia a la tracción indirecta (ITS)

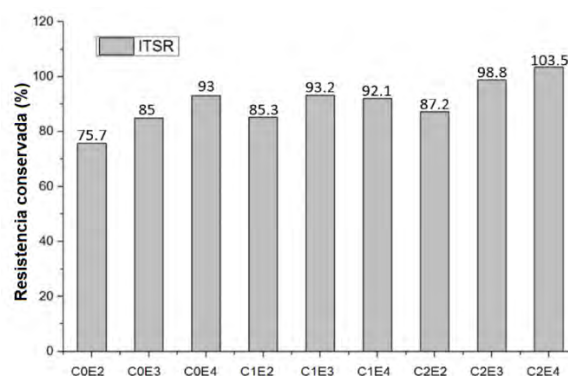


Figura 4. Resistencia conservada

En el caso del ahuellamiento (EN 12697-22), realizada a 60°C, se fabricaron dos muestras de cada dosis y el resultado fue el valor promedio expresado en mm / 103 ciclos. El resultado de esta prueba es la pendiente de deformación en el aire (WTS<sub>air</sub>) que se presenta en la figura 5.

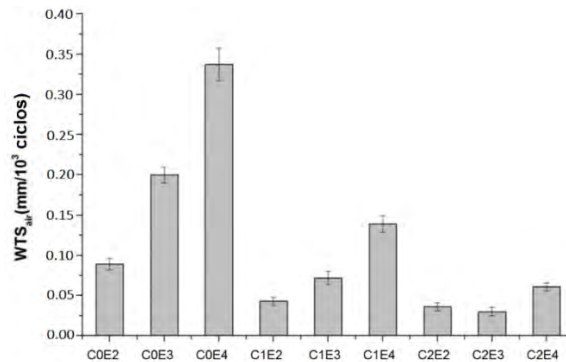


Figura 5. Resultado del ensayo de ahuellamiento

Para el módulo de rigidez diametral (EN 12697-26), se fabricaron tres muestras para cada fórmula, que se analizaron a 20 ° C en 2 direcciones como indica la norma (perpendiculares entre sí). El resultado de la prueba fue el promedio del módulo de rigidez obtenido en las tres muestras en ambas direcciones (6 mediciones) y se presenta en la figura 6.

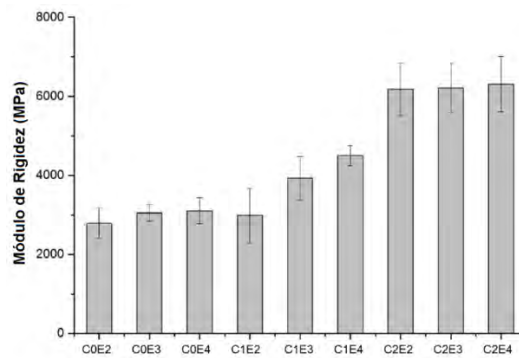


Figura 6. Módulo de rigidez

El ensayo de fatiga (EN 12697-24) mide el número de ciclos de carga que la muestra puede resistir antes de reducir su módulo a la mitad de la inicial. Para el estudio, realizado a 20 ° C, se utilizó una carga de 1.4 KN. Con esta carga, todas las mezclas cumplen con el rango de deformación establecido en la norma (100-400 µε). Los resultados obtenidos para cada fórmula se muestran en la figura 7.

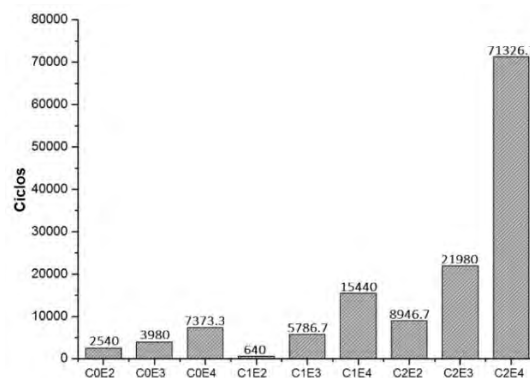


Figura 7. Vida a fatiga diametral.

Además de la prueba mecánica, el contenido de huecos también se calculó y se presenta en la figura 8, para lo cual fue necesario medir la densidad máxima y la densidad aparente. La densidad aparente se calculó como el promedio de las densidades aparentes de las muestras cilíndricas fabricadas para cada fórmula.

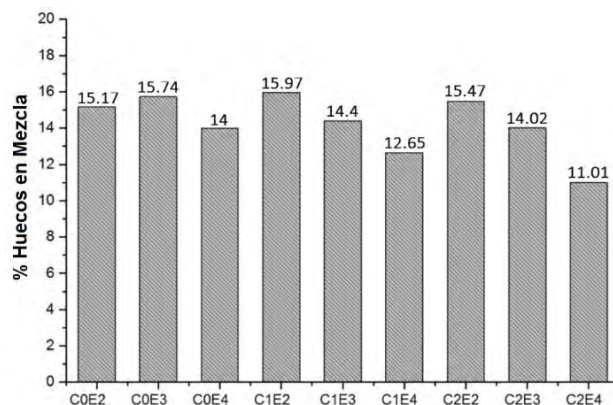


Figura 8. Porcentaje de huecos en mezcla.

El resumen de los resultados obtenidos para cada fórmula para todos los parámetros se presenta en la tabla 3. A partir de ella, se puede realizar la evaluación de cada una de las mezclas. Se analizaron nueve mezclas para seis propiedades (Huecos en mezcla, resistencia a tracción indirecta, sensibilidad al agua, ahuellamiento, módulo de rigidez y vida de fatiga) y se obtuvo un total de  $9 \times 6 = 54$  valores.

Tabla 3. Resultados medidos de los ensayos.

Mezcla	Huecos en mezcla (%)	ITS <sub>seco</sub> (KPa)	ITSR (%)	WTS (mm/10 <sup>3</sup> ciclos)	Módulo de rigidez (MPa)	Fatiga (ciclos)
C0E2	15.2	775.0	75.7	0.089	2793.9	2540
C0E3	15.7	853.5	85.0	0.200	3056.7	3980
C0E4	14.0	921.5	93.0	0.337	3105.8	7373
C1E2	16.0	665.0	85.3	0.043	2986.2	640
C1E3	14.4	865.8	93.2	0.072	3928.6	5787
C1E4	12.7	1052.3	92.1	0.139	4503.3	15440
C2E2	15.5	758.8	87.2	0.036	6178.9	8947
C2E3	14.0	914.8	98.8	0.030	6211.6	21980
C2E4	11.0	1096.0	103.5	0.061	6308.3	71327

No es fácil elegir la mejor combinación basada solo en los resultados particulares de cada prueba, porque las propiedades se consideran de forma aislada y no en su rendimiento general. Por este motivo, se ha propuesto una metodología para calificar en un solo valor todos los resultados obtenidos para cada mezcla. De esta manera, la comparación de la mezcla en estudio es más fácil de realizar.

#### 4 Metodología para el diseño de la mezcla

##### 4.1 Índices de desempeño

Esta investigación propone una metodología para evaluar el comportamiento de las mezclas debido a la variación del contenido de emulsión y cemento, en función de los resultados de las pruebas realizadas anteriormente. Los índices de desempeño se definieron para evaluar los resultados obtenidos de cada



ensayo en un rango de 0 a 1. La relación entre el resultado del ensayo y el índice de desempeño se indica en un gráfico para cada prueba. Estos gráficos, que se explican a continuación, evalúan los resultados considerando como valor máximo aquellos más favorables para el buen desempeño de la mezcla. La puntuación final de una mezcla se calcula utilizando el promedio de todos los índices de rendimiento obtenidos para la mezcla.

En la Figura 9 se presenta un gráfico para el índice de rendimiento de vacío de aire. Esta propuesta toma el contenido del 10% como objetivo de compactación, establecido como el valor máximo (1). El valor del índice disminuye linealmente al aumentar el contenido de vacío de aire, llegando a cero en un 20%, establecido como el límite máximo de vacío de aire. Debido a la naturaleza de este tipo de mezclas, es muy difícil obtener contenidos vacíos muy bajos. Por lo tanto, los bajos contenidos de vacío podrían deberse a una granulometría inadecuada, por lo que se establece que por debajo del 10% del contenido de vacío de aire, el índice disminuye linealmente hasta alcanzar un valor de 0.25 para el 2.5%. Los valores inferiores al 2.5% son prácticamente imposibles, pero se supone un índice constante de 0.25.



Figura 9. Índice de huecos ( $I_{\text{huecos}}$ )

La resistencia a la tracción indirecta es una propiedad de la mezcla que depende de los materiales con los que se ha producido. Por lo tanto, no es posible establecer valores numéricos fijos para evaluar el comportamiento de todas las mezclas, por lo que se expresa a partir del valor máximo obtenido. Se propone que los valores inferiores al 20% del ITS máximo tengan un valor de 0; entre el 20% y el 80% del valor máximo de ITS tiene un valor que crece de 0 a 1 de manera lineal, y desde los valores del 80% del máximo, el valor del índice es 1 (Fig. 10).

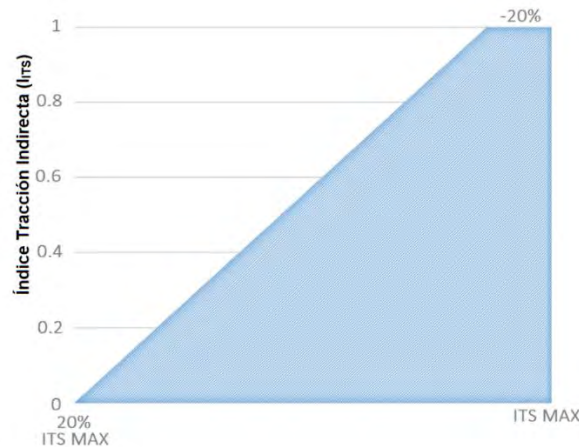


Figura 10. Índice de tracción indirecta ( $I_{\text{ITS}}$ )

En cuanto al Índice de resistencia a la tracción indirecta (Fig. 11), todos los valores inferiores al 70% se consideran cero, ya que se encuentran por debajo de los límites establecidos en el artículo 543 de la Especificación técnica española para carreteras y puentes PG-3 [19] para poco tráfico. Del 70% al 100% habrá un crecimiento lineal, comenzando desde 0.25 para el 70% hasta alcanzar la tasa máxima al 100%. Todos los valores superiores al 100% se consideran como 1.

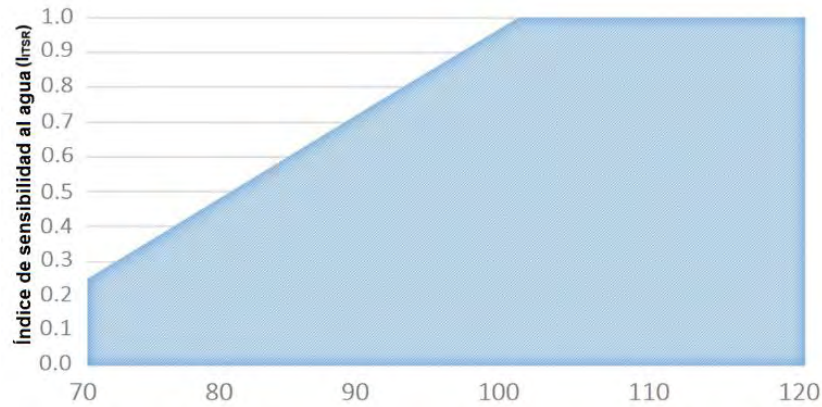


Figura 11. Índice de sensibilidad al agua ( $I_{ITSR}$ )

Para el ahuellamiento se consideró que los índices deben tener un comportamiento que puntúe menos a medida que aumenta la profundidad de la deformación. En primera instancia, se considera que el rango entre 0 y 0.02 es el rango más deseado, por lo que el valor del índice se establece en 1. Un valor de 0.05, todavía es bastante aceptable, por lo que se fija un valor de 0.8 a El índice. Los valores en el rango 0.02-0.05 disminuyen de 1 a 0.8. De 0.08 a 0.1, el valor disminuye hasta que llega a cero, ya que es el valor máximo permitido en las especificaciones (EN 12697-22). El gráfico de rendimiento para el índice de ahuellamiento se muestra en la figura 12.

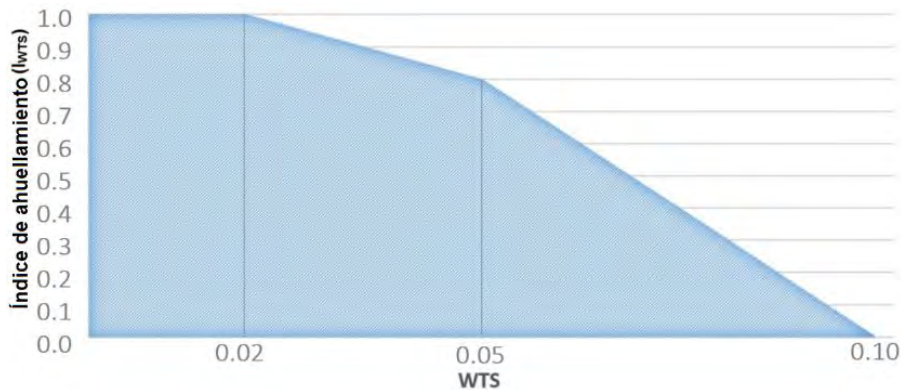


Figura12. Índice de ahuellamiento

El índice del módulo de rigidez se refiere al valor máximo del módulo de rigidez obtenido de todas las mezclas estudiadas. Consideramos valores deseables del 80% del valor máximo obtenido para todas las mezclas en estudio. Para los valores que van del 0 al 80% del módulo de rigidez máxima, se considera un aumento lineal que va de 0 a 1 (Figura 13).



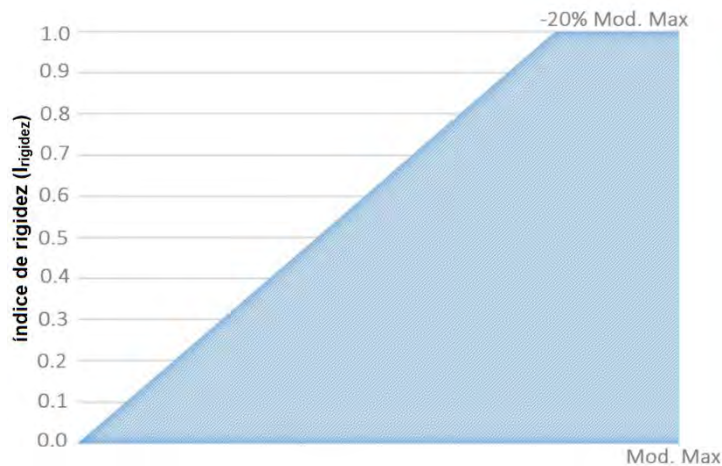


Figura 13. Índice de rigidez ( $I_{\text{rigidez}}$ )

La fatiga resultó ser un fenómeno complejo, debido a la dispersión de los resultados obtenidos. Como en el caso del módulo de rigidez, no puede expresarse en valores numéricos absolutos, sino en relación con el valor máximo obtenido. Por lo tanto, se han tenido en cuenta:

- El valor máximo de los ciclos obtenidos se considera como la mejor puntuación, por lo tanto, se le asigna un valor de índice de 1.
- Se considera que  $2/3$  del valor máximo se establece como un valor intermedio, por lo que se asigna la mitad del valor del índice; 0.5.
- Se establece que  $1/3$  del valor máximo es un valor igual a un cuarto del valor obtenido por el máximo, es decir, 0.25.

Teniendo en cuenta lo anterior, se ha propuesto la ecuación 1 que cumple con los criterios establecidos siguientes consideraciones.

$$0,125 \times 2^{(3F / F.\text{max})} \quad (1)$$

Donde F es el valor de fatiga obtenido para la mezcla y F. max es el valor máximo de ciclos obtenidos en la prueba de fatiga diametral.

Además, se ha establecido que la ecuación es válida para valores superiores al 10% del valor máximo de los ciclos de fatiga en el rango de 0 a 10%, el valor aumenta linealmente desde cero. La figura 14 representa el gráfico de rendimiento para la prueba de fatiga.

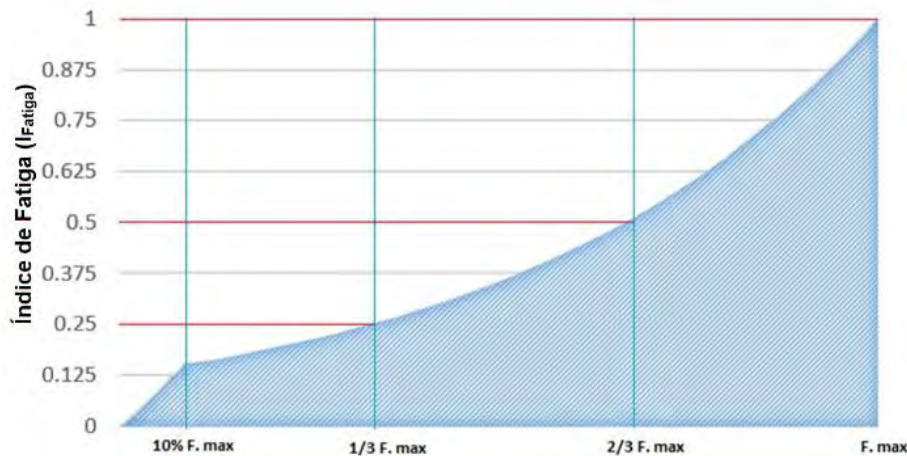


Figura 14. Índice de Fatiga ( $I_{\text{fatiga}}$ )

#### 4.2 Evaluación del diseño

Con los índices definidos para evaluar el comportamiento del material, la evaluación se lleva a cabo, de modo que cada mezcla tendrá un valor de índice para cada propiedad evaluada. Con los valores de todos los índices, se obtiene un Índice global de desempeño (IGD) de la fórmula como el promedio de los seis índices de una mezcla, como se muestra en la ecuación 2. Por lo tanto, la mezcla con el IGD más alto se considerará la fórmula óptima.

$$IGD = \frac{(I_{huecos} + I_{rigidez} + I_{ITS} + I_{ITSR} + I_{ahuellamiento} + I_{Fatiga})}{6} \quad (2)$$

#### 5 Análisis de resultados.

En la tabla 5 se muestra un resumen de los índices de rendimiento calculados según la metodología propuesta y el Índice global de desempeño.

Tabla 5. Índices de rendimiento y evaluación de la mezcla (IGD)

MEZCLA	% Huecos	ITS <sub>seco</sub>	ITSR	WTS	Módulo de rigidez	Fatiga	IGD
C0E2	0.4832	0.8452	0.3925	0.1760	0.5536	0.0548	0.4176
C0E3	0.4265	0.9646	0.6250	0.0000	0.6057	0.0859	0.4513
C0E4	0.5996	1.0000	0.8250	0.0000	0.6154	0.1550	0.5325
C1E2	0.4026	0.6779	0.6325	0.8467	0.5917	0.0138	0.5275
C1E3	0.5605	0.9832	0.8300	0.4480	0.7785	0.1249	0.6208
C1E4	0.7351	1.0000	0.8025	0.0000	0.8923	0.1961	0.6043
C2E2	0.4533	0.8205	0.6800	0.8933	1.0000	0.1623	0.6682
C2E3	0.5983	1.0000	0.9700	0.9333	1.0000	0.2372	0.7898
C2E4	0.8988	1.0000	1.0000	0.6240	1.0000	1.0000	0.9205

El IGD calculado para cada fórmula refleja el comportamiento de la mezcla. Cuanto más alto sea el IGD, mejor será el rendimiento de la mezcla. Los resultados se representaron en una matriz cuyos ejes fueron el contenido de cemento y el contenido de emulsión, como se muestra en la figura 15. Para este caso de estudio, la fórmula óptima contiene 2% de cemento y 4% de emulsión sobre peso de RAP.

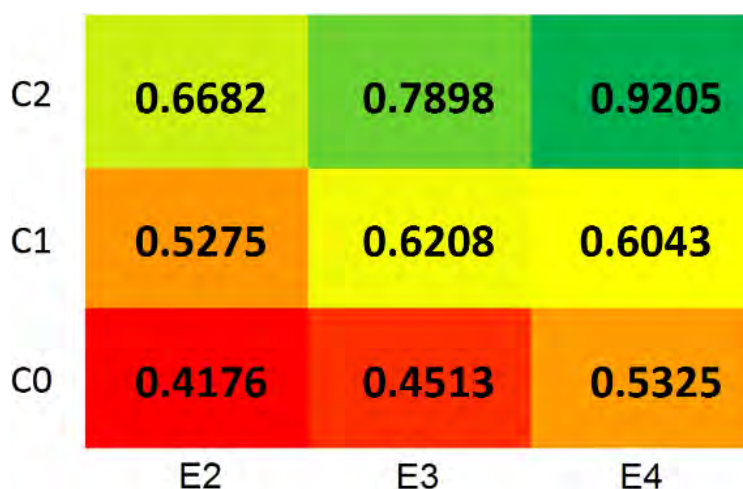


Figura 15. Matriz de desempeño de cada mezcla

De acuerdo con los resultados obtenidos de la evaluación de las pruebas, se pueden hacer algunas consideraciones. Se puede observar que para el contenido de huecos en mezcla, la resistencia a la tracción indirecta y la sensibilidad al agua, tanto el aumento en el cemento como el aumento en la emulsión mejoran los resultados. En cuanto al ahuellamiento, se puede observar que un aumento en el contenido de emulsión produce resultados más altos en el WTSair, por lo que es perjudicial para la mezcla. Por el contrario, el contenido de cemento reduce considerablemente los valores de formación de surcos, lo que hace que la mezcla sea más resistente a las deformaciones permanentes. En el módulo de rigidez y las pruebas de fatiga, el factor principal que afecta los resultados es el cemento, ya que hay una mejora pronunciada en ambos, los valores de la rigidez y la resistencia a los ciclos de fatiga.

Estos resultados, aparentemente contradictorios en algunos casos (es decir, el aumento de la emulsión mejora algunas propiedades pero pueden hacer que la mezcla sea propensa a la formación de depósitos), hacen evidente la necesidad de un método que reúna todas las variables involucradas en el rendimiento de la mezcla y permita la ingeniería para tomar una decisión objetiva sobre la fórmula de combinación de trabajo definitiva.

## 6 Conclusiones

Se ha desarrollado un sistema de evaluación de cada propiedad basado en gráficos de desempeño al considerar las regulaciones actuales de cada prueba, así como las experiencias obtenidas por otros investigadores. De los resultados obtenidos en el laboratorio, cada propiedad ha sido evaluada para obtener el índice de desempeño respectivo. Una vez que se obtuvieron los resultados de todos los índices, la evaluación de cada mezcla se llevó a cabo a través del Índice global de desempeño (IGD). Los resultados obtenidos se representaron gráficamente, lo que nos llevó a las siguientes conclusiones.

- Los índices propuestos son sensibles a los cambios, por lo que el IGD varía según la fórmula de la mezcla de trabajo analizada.
- El método considera múltiples parámetros de la mezcla que se simplifican con la metodología en un solo valor (IGD) que garantiza que la elección de una mezcla se basa en criterios técnicos y cuantitativos.
- El Índice global de desempeño se puede usar no solo para comparar variaciones de una fórmula de combinación de trabajo, sino también para comparar los resultados de varias granulometrías, emulsiones, etc.

Este estudio presenta una metodología que parece prometedora para la optimización de este tipo de mezclas. Se pretende proporcionar una metodología que mejore la optimización de mezclas recicladas en frío con emulsión. Al hacerlo, esta técnica se puede utilizar de forma progresiva y, de este modo, contribuir a mejorar las superficies de las carreteras de una manera más eficiente cuando se realiza in situ y con menos impacto ambiental.

## 7 Agradecimientos

Esta investigación se desarrolló dentro del Proyecto REPARA2.0 “Desarrollo de nuevas técnicas y sistemas de información para la rehabilitación sostenible de pavimentos” (IDI-20150722), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) del Gobierno de España en el marco del Programa Estratégico CIEN. Se agradece también al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-México) por haber otorgado la Beca de doctorado.

## 8 Referencias

- [1] I. Rodríguez-Fernández *et al*, "Recyclability potential of asphalt mixes containing reclaimed asphalt pavement and industrial by-products," *Construction and Building Materials*, vol. 195, pp. 148-155, 2019.
- [2] G. Valdes-Vidal, A. Calabi-Floody and E. Sanchez-Alonso, "Performance evaluation of warm mix asphalt involving natural zeolite and reclaimed asphalt pavement (RAP) for sustainable pavement construction," *Construction and Building Materials*, vol. 174, pp. 576-585, 2018.

- [3] A. Bonicelli *et al*, "Experimental study on the use of rejuvenators and plastomeric polymers for improving durability of high RAP content asphalt mixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 155, pp. 37-44, 2017.
- [4] M. Faramarzi *et al*, "A case study on a cement treated RAP containing asphalt emulsion and acryl polymer," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 9, pp. e00211, 2018.
- [5] M. Dinis-Almeida *et al*, "Performance of Warm Mix Recycled Asphalt containing up to 100% RAP," *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 1-6, 2016.
- [6] L. Noferini *et al*, "Investigation on performances of asphalt mixtures made with Reclaimed Asphalt Pavement: Effects of interaction between virgin and RAP bitumen," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 10, (4), pp. 322-332, 2017.
- [7] C. López *et al*, "Stabilized emulsions to produce warm asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavements," *Journal of Cleaner Production*, vol. 209, pp. 1461-1472, 2019.
- [8] R. Izaks *et al*, "Hot Mix Asphalt with High RAP Content," *Procedia Engineering*, vol. 114, pp. 676-684, 2015.
- [9] R. Ghabchi *et al*, "Comparison of laboratory performance of asphalt mixes containing different proportions of RAS and RAP," *Construction and Building Materials*, vol. 124, pp. 343-351, 2016.
- [10] M. Fakhri and A. Ahmadi, "Evaluation of fracture resistance of asphalt mixes involving steel slag and RAP: Susceptibility to aging level and freeze and thaw cycles," *Construction and Building Materials*, vol. 157, pp. 748-756, 2017.
- [11] M. Zaumanis, J. Oga and V. Haritonovs, "How to reduce reclaimed asphalt variability: A full-scale study," *Construction and Building Materials*, vol. 188, pp. 546-554, 2018.
- [12] H. Gong, B. Huang and X. Shu, "Field performance evaluation of asphalt mixtures containing high percentage of RAP using LTPP data," *Construction and Building Materials*, vol. 176, pp. 118-128, 2018.
- [13] Y. Wang, "The effects of using reclaimed asphalt pavements (RAP) on the long-term performance of asphalt concrete overlays," *Construction and Building Materials*, vol. 120, pp. 335-348, 2016.
- [14] J. Lin, J. Hong and Y. Xiao, "Dynamic characteristics of 100% cold recycled asphalt mixture using asphalt emulsion and cement," *Journal of Cleaner Production*, vol. 156, pp. 337-344, 2017.
- [15] P. Leandri, M. Losa and A. Di Natale, "Field validation of recycled cold mixes viscoelastic properties," *Construction and Building Materials*, vol. 75, pp. 275-282, 2015.
- [16] C. Brovelli and M. Crispino, "Investigation into cold recycled materials: Influence of rejuvenant, mix design procedure and effects of temperature on compaction," *Construction and Building Materials*, vol. 37, pp. 507-511, 2012.
- [17] A. Chomicz-Kowalska and K. Maciejewski, "Multivariate Optimization of Recycled Road Base Cold Mixtures with Foamed Bitumen," *Procedia Engineering*, vol. 108, pp. 436-444, 2015.
- [18] Ministerio de Fomento, Ediciones Liteam., "Dirección General de Carreteras. Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de conservación de carreteras PG-4." Madrid, 2001.
- [19] Ministerio de Fomento, Ediciones Liteam., "Dirección General de Carreteras. Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes PG-3." Madrid, 2001.