INFLUENCIA DEL MÉTODO DE COMPACTACIÓN EN LAS MEZCLAS RECICLADAS CON EMULSIÓN. DIFERENCIA ENTRE LA COMPACTACIÓN PROCTOR Y LA GIRATORIA PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS.

Guillermo Flores[1]

[1] LASFALTO S de RL de CV, Zapopan, México, guillermo.flores@lasfalto.com.mx

Resumen

El presente trabajo tiene por objeto estudiar las condiciones para la compactación de las mezclas recicladas en frío con emulsión y 100% RAP y comparar dos métodos para el diseño volumétrico de este tipo de mezclas. Para tal fin, se ha investigado la influencia de la emulsión y el agua de preenvuelta en las propiedades finales de las mezclas recicladas. Para lograr estos propósitos, el material asfáltico recuperado procedente del fresado de un pavimento dañado se mezcló con diferentes proporciones de agua y emulsión asfáltica y fueron compactadas por medio del compactador PROCTOR y el compactador giratorio. Como resultado de la investigación, Se ha podido determinar que el compactador giratorio presenta una compactación más cercana a la obtenida en campo, sin embargo, la compactación de impacto PROCTOR es capaz de determinar la mejor mezcla a pesar de que los resultados son diferentes a los obtenidos en campo. Los resultados demuestran el agua de preenvuelta resulta conveniente ser considerado aparte de la emulsión, y no como fluidos totales y que se presenta una ligera variación entre el resultado obtenido por los dos métodos de compactación estudiados. Estos resultados son relevantes, ya que de esta manera se puede optimizar las propiedades volumétricas de la mezcla final y de esta manera obtener mejores resultados en el comportamiento.

Palabras Clave: Mezcla reciclada, Emulsión, Compactación

1 Introducción

La compactación es uno de los pasos más críticos en el proceso de construcción de carreteras, por su gran influencia en el desempeño a corto y largo plazo del pavimento. Durante la compactación, los agregados se juntan creando un esqueleto que brinda resistencia a las deformaciones y limita la permeabilidad al reducir el contenido de vacíos. El proceso de compactación puede verse afectado por muchos factores, como las propiedades del ligante asfáltico y los agregados, el tipo de mezcla, la temperatura de compactación, el espesor de capa, las propiedades de la capa subyacente y las condiciones ambientales[1].

Una compactación adecuada significa menos reorientaciones de partículas bajo la carga. Menos reorientaciones de partículas también significan menos deformaciones plásticas del material. Además, la compactación adecuada asegura más puntos de contacto entre partículas, lo que da como resultado fuerzas más pequeñas en los puntos de contacto entre partículas [2].

Tanto en el laboratorio como en el campo, los controles son necesarios para verificar los contenidos vacíos del material. Dentro de un entorno de laboratorio, la atención se centra en reproducir las condiciones in situ lo más fielmente posible utilizando el equipo apropiado [3].

Existen varios métodos de laboratorio que incluyen compactación por impacto, compactación por amasado, compactación giratoria y compactación con segmento circular. Sin embargo, diferentes

métodos en el laboratorio pueden producir muestras idénticas con respecto a la densidad mientras exhiben diferentes propiedades mecánicas [4].

La estabilidad Marshall y las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas se ven afectadas significativamente por la temperatura de compactación, y las mezclas con el mismo tamaño de agregado máximo nominal pero diferente tipo de gradación requieren diferentes niveles de compactación para lograr la densidad diseñada [5].

Durante los últimos 50 años, el diseño Marshall, basado en la compactación por impacto, dominó la industria mundial de la pavimentación. Por otro lado, el método de diseño de mezcla Superpave ha permitido una mejor comprensión del proceso de compactación al introducir el compactador giratorio Superpave (SGC) [1].

Los diseños de mezclas Marshall y Superpave se basan principalmente en parámetros volumétricos. El método tradicional de compactación Marshall ya ha sido cuestionado por varios estudios por no parecerse al que se practica en el campo [6]. En la actualidad, el método de compactación principal en varios países está cambiando al compactador giratorio Superpave (SGC) [7].

El comportamiento durante la compactación de la mezcla asfáltica y su influencia durante su colocación y su posterior estabilidad mecánica se puede simular a escala de laboratorio, mediante el registro continuo de datos sobre el porcentaje de compactación en relación al número de ciclos del compactador giratorio [8].

No obstante, en el caso de mezclas frías, y especialmente en mezclas recicladas en frío, no existe suficiente información sobre la influencia del método de compactación en las propiedades finales del material, pero para el diseño de la mezcla, la elección suele basarse únicamente en el contenido de vacíos. El contenido óptimo de ligante para este tipo de mezclas se selecciona tradicionalmente mediante la prueba Proctor modificada, que es una prueba utilizada para capas granulares y suelos.

En el caso de España, la especificación para la rehabilitación de carreteras PG4 [9], originalmente exigía la dosificación mediante la prueba de Proctor modificada. En 2017 la norma ha cambiado para exigir un compactador giratorio que especifique el diámetro del molde según la granulometría, así como el número de giros.

El éxito del diseño de la mezcla depende en gran medida del método utilizado. El pavimento asfáltico alcanza la densidad establecida en laboratorio mediante suficientes esfuerzos de compactación en campo. Por lo tanto, es de gran importancia comprender las características de compactación de las mezclas asfálticas [7].

Incluso teniendo el mejor diseño o los materiales de la más alta calidad, si la mezcla de asfalto se compacta incorrectamente, se compacta poco o se compacta demasiado, no se obtendrá el mejor rendimiento del pavimento [10]. El pavimento de asfalto compactado incorrectamente no tiene la capacidad de transferir cargas de la superficie al suelo.

En las técnicas de ingeniería vial, la densidad óptima de materiales es un parámetro introducido para obtener el mejor comportamiento mecánico del material en condiciones de carga. La compactación está destinada a reducir el contenido de huecos de aire, optimizar el esqueleto granular y aumentar la densidad del material [3].

Algunas fallas del pavimento, como surcos, filtraciones de agua, grietas, aparecen fácilmente en el pavimento de asfalto poco compactado. Por tanto, controlar razonablemente el grado de compactación es la clave para garantizar la vida sana del pavimento asfáltico [10].

La distribución de los huecos de aire también afecta la presencia y el movimiento del agua en las mezclas asfálticas. El agua debilita la unión adhesiva entre los agregados y los aglutinantes, y la unión cohesiva dentro de la propia masilla, lo que provoca la desintegración de la mezcla asfáltica y, en última instancia, la falla de la estructura del pavimento [2].

Una mezcla de asfalto que presenta una buena compactación se puede comprimir fácilmente a los requisitos de diseño de volumen, al tiempo que muestra un cierto nivel de estabilidad, una buena resistencia a la deformación y un alto rendimiento durante la vida útil de la carretera [5].

Además, el proceso de compactación requiere suficientes rodillos, que son la principal fuente de emisiones de carbono en esta zona. Las emisiones de carbono de estos métodos de compactación son diferentes y necesitan una evaluación adecuada para satisfacer las crecientes preocupaciones y regulaciones para minimizar la huella de carbono [11].

Por ello, en el presente estudio decidimos evaluar la influencia del método de compactación en la dosificación de mezclas recicladas en frío con emulsión considerando la compactación con el ensayo Proctor modificado y la compactación giratoria según la antigua y nueva versión de la normativa española. El objetivo es elaborar un estudio comparativo Proctor / Compactador Giratorio sobre una serie de fórmulas de trabajo que serán compactadas y estudiadas por ambos métodos. La comparación se llevará a cabo en términos de densidad y vacíos de aire. El objetivo final de esta parte de la investigación es dejar clara la idoneidad de ambos métodos de compactación para el diseño en mezcla reciclada en frío con emulsiones bituminosas.

2 Materiales

Se produjo una mezcla fría con emulsión con pavimento asfáltico reciclado (RAP), cuatro porcentajes de emulsión (1,2,3,4%) y cuatro porcentajes de agua de preenvuelta (1,2,3,4%) con respecto al peso del RAP.

La granulometría del RAP fue la banda RE2 recomendada por la normativa española PG4 [9] como se muestra en la Tabla 1. No se añadió agregado virgen.

Tabla 1. Granulometría RE2 (PG4).

MALLA (mm)	20	12.5	8	4	2	0.5	0.25	0.063
CURVA 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

La densidad máxima (EN 12697-5) del RAP fue de 2.443 kg / m3. El betún envejecido se extrajo del RAP para conocer sus propiedades. La Tabla 2 presenta los resultados.

Tabla 2. Propiedades del asfalto recuperado.

PROPIEDADES	NORMATIVE	VALUES
Asfalto (% sobre peso de RAP)	EN 12697-1	4.89
Punto de reblandecimiento(ºC)	EN 1427	80.3
Penetración (10^{-1}mm)	EN 1426	11

Para la elaboración de las muestras de laboratorio se utilizó una emulsión bituminosa catiónica comercial recomendada para aplicaciones de reciclaje en frío, con un contenido de asfalto residual del 60%, de rotura lenta (B5), producida con agentes rejuvenecedores (C60 B5 REC REJUV).

3 Metodología

El objetivo de esta parte de la investigación es conocer la influencia de los métodos de compactación sobre las propiedades volumétricas de las probetas de mezclas asfálticas recicladas en frío con emulsión, ya que en la literatura se ha observado que los métodos de compactación tienen diferentes efectos, dependiendo del tipo de mezcla a diseñar. Se realizaron los métodos de compactación proctor y giratoria, para comparar los resultados y determinar la posible influencia del procedimiento de compactación.

Para este estudio, se probaron 16 fórmulas diferentes, incluidos 4 porcentajes de emulsión (1,2,3,4%) y cuatro porcentajes de agua de preenvuelta (1,2,3,4%).

3.1 Procedimientos de compactación

Para la prueba proctor modificada (UNE 103501-94) se necesitaron 7 kg de RAP para una muestra compactada en el molde estandarizado. La compactación fue por impacto, con masa calibrada de 4.535 kg y una altura de caída estándar de 457 mm. Las muestras se compactaron en cinco capas con 60 golpes en toda la superficie del material. Una vez finalizada la compactación, se retiró la extensión del molde para eliminar el material sobrante. El objetivo era medir la masa del material dentro del molde y luego calcular la densidad húmeda (ρw), utilizando el volumen conocido del molde. Para cada dosificación se elaboraron dos muestras y el resultado se obtuvo como el promedio de las mismas.

En el caso de la compactación giratoria, se necesit una cantidad mucho menor de material para producir una muestra. Dado que las probetas producidas tienen 100 mm de diámetro y alturas entre 60 y 70 mm, se requirió 1 kg de RAP para llenar el molde. El material fue compactado a 100 giros, que es la energía de compactación recomendada por la normativa española para materiales reciclados en frío con emulsión. La compactación se realizó con un ángulo de rotación interno de 0,82, una velocidad de 30 rpm y una presión máxima de 600 kPa. Se fabricaron dos muestras para cada dosis y el resultado se calculó como promedio.

3.2 Densidad máxima

La densidad máxima es un concepto teórico que representa el material sin vacíos de aire. Eso significa que la muestra contiene solo material sólido alojado de modo que el contenido de huecos de aire sea cero. Esto se obtiene con la ayuda del picnómetro, que nos permite conocer el volumen sin vacíos de aire en el material. Cuando se conoce la masa seca, se puede calcular la densidad máxima. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.

La nomenclatura utilizada para identificar cada fórmula consta de la letra A seguida del contenido de agua de la premezcla y la letra E seguida del contenido de la emulsión. El contenido de agua y emulsión se expresa sobre el peso de RAP. De esta forma, la identificación de cada fórmula es fácil.

Tabla 3. Densidad máxima de mezclas estudiadas**.**

MEZCLA	DENSIDAD MÁXIMA (kg/m^3)
A1E1	2470
A1E2	2443
A1E3	2431
A1E4	2374
A2E1	2491
A2E2	2449
A2E3	2419
A2E4	2392
A3E1	2496
A3E2	2432
A3E3	2409
A3E4	2384
A4E1	2498
A4E2	2455

A4E3	2422
A4E4	2365

3.3 Densidad bruta y contenido de vacíos

En el caso del ensayo Proctor modificado, una vez finalizada la compactación y pesado el molde con el material, se extrae un núcleo de material del centro de la probeta. Esta operación se realiza para pesarlo y luego meterlo al horno para eliminar la humedad. Esto se logró a 70 ° C durante 1 día, y luego se volvió a pesar para obtener el contenido de humedad. Teniendo la humedad del material y la densidad húmeda (peso de la muestra / volumen del molde), es posible calcular la densidad aparente obtenida por la compactación usando la ecuación 1.

$$\rho_b = \frac{\rho_w}{(1+w)} \qquad (1)$$

Donde ρb es la densidad aparente, ρw es la densidad en húmedo yw es la humedad medida en la muestra.

El contenido de huecos de aire se calculó mediante la densidad aparente y la densidad máxima, siguiendo la ecuación 2. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.

$$Contenido\ de\ Vacios(\%) = \frac{\rho_{max}-\rho_b}{\rho_{max}} \times 100 \qquad (2)$$

Donde ρ_max es la densidad máxima y ρb es la densidad aparente.

Tabla 4 Densidad aparente y contenido de huecos de aire

MEZCLA	DENSIDAD BRUTA (kg/m^3)	CONTENIDO DE VACÍOS
A1E1	1855	24.9
A1E2	1857	24
A1E3	1847	24
A1E4	1846	22.3
A2E1	1879	24.6
A2E2	1865	23.8
A2E3	1857	23.2
A2E4	1869	21.9
A3E1	1897	24
A3E2	1893	22.1
A3E3	1909	20.8
A3E4	1895	20.5
A4E1	1907	23.6
A4E2	1884	23.3
A4E3	1888	22
A4E4	1867	21.1

En el caso de la compactación giratoria, la densidad aparente se midió por el método volumétrico (como en el procedimiento Proctor). Por esta razón, el volumen se calculó en función del diámetro y la altura

de la muestra. El peso por densidad aparente corresponde al material seco, por lo que fue necesario meter todas las muestras en el horno para evaporar toda la humedad, lo cual se logró luego de 3 días a 50ºC. Los resultados de la densidad aparente y el contenido de huecos de aire se muestran en la Tabla 5 y se calcularon con la ayuda de la ecuación 2.

Tabla 5 Densidad bruta y contenido de vacíos para compactación giratoria.

MEZCLA	DENSIDAD APARENTE (kg/m3)	CONTENIDO DE VACÍOS
A1E1	1962.7	20.5
A1E2	1963	19.6
A1E3	1990.2	18.1
A1E4	1995.3	16
A2E1	1961.8	21.2
A2E2	1990.6	18.7
A2E3	2019.1	16.5
A2E4	2009.9	16
A3E1	1951.5	21.8
A3E2	1994.4	18
A3E3	2025.3	15.9
A3E4	2021.9	15.2
A4E1	1943.4	22.2
A4E2	1932.2	21.3
W4E3	1951.9	19.4
W4E4	1983	16.2

4 Análisis de resultados

Se decidió realizar el análisis de la compactabilidad en base a dos de las propiedades volumétricas que se utilizan frecuentemente para el diseño de mezclas, como son la densidad aparente y el contenido de vacíos de aire en la mezcla. La Figura 1 muestra la comparación de la densidad aparente obtenida con el compactador giratorio y el procedimiento Proctor modificado, para cada contenido de agua agregado a la mezcla. Por otro lado, la figura 2 muestra la comparación de los resultados de estos dos métodos para el contenido de huecos de aire, teniendo en cuenta los diferentes contenidos de agua de la premezcla añadida.

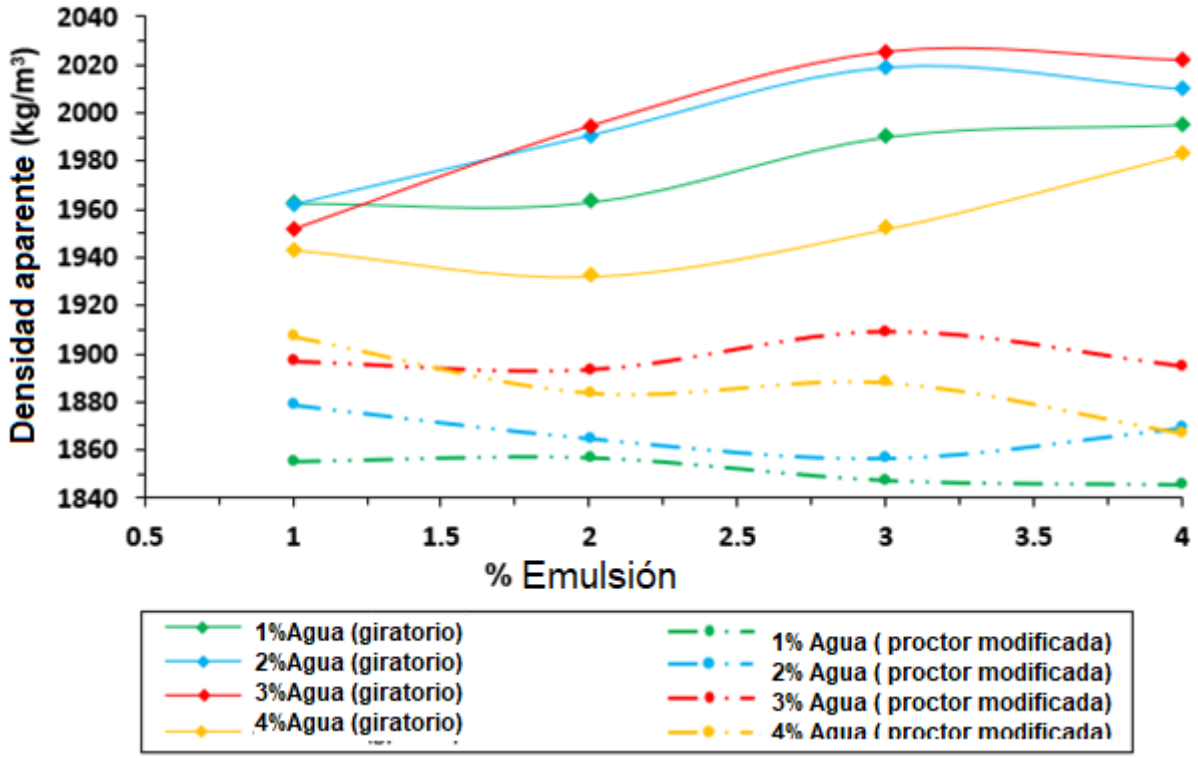

Figura. 1 Comparación de densidad bruta para diferentes contenidos de agua de preenvuelta.

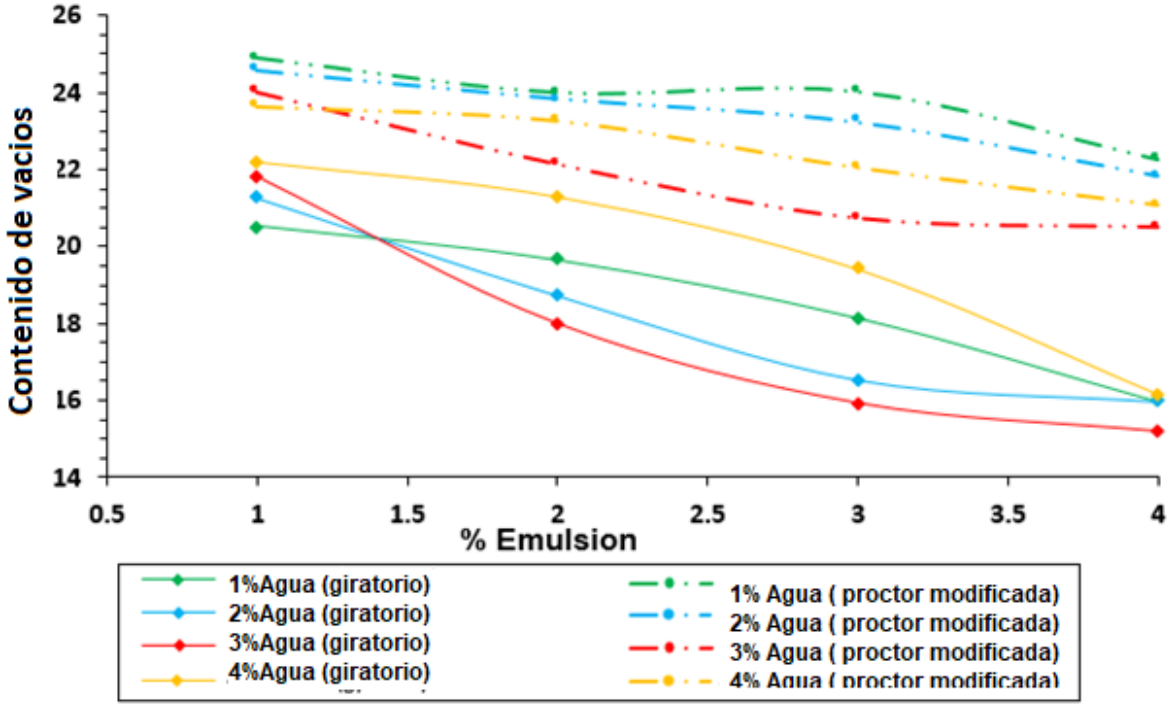

Figura. 2 Comparación de contenido de vacíos para diferentes contenidos de agua de preenvuelta.

Se pueden hacer varias consideraciones a partir de los resultados obtenidos en los gráficos anteriores.

En una primera instancia, se puede notar que si bien los comportamientos de ambos métodos de compactación muestran tendencias similares (el contenido de huecos de aire disminuye al aumentar el% de emulsión), se encuentran diferencias significativas. Primero, se puede observar que la compactación con ambos métodos comienza con valores de vacíos de aire similares para contenidos de emulsión bajos, pero a medida que el contenido de emulsión es mayor, la pendiente de los gráficos giratorios es mayor, por lo que se obtienen valores de contenido de vacíos más bajos. Esto podría indicar que el método giratorio es más sensible al contenido de emulsión que el procedimiento Proctor.

En la compactación con método giratorio, se puede notar que el contenido de agua de la premezcla ayuda a mejorar la compactabilidad en la mayoría de los casos. Por esta razón se observa una disminución del contenido de huecos de aire entre los valores de 1 a 3%. Sin embargo, el 4% del agua premezclada da como resultado el peor rendimiento, alcanzando valores aún más altos de contenido de huecos de aire que para el 1% del agua premezclada. Esto se puede explicar porque el agua alcanza un punto óptimo máximo en el que crece la compactabilidad, porque el agua facilita la acomodación de los áridos. Sin embargo, cuando se supera ese punto, el agua de la premezcla deja de funcionar como lubricante y, a medida que el material se confina, comienza a contribuir mecánicamente a la resistencia a la compactación.

En el caso del proctor, el contenido de huecos de aire también disminuye con el aumento del contenido de emulsión, pero los valores obtenidos son mayores que en el caso de la compactación giratoria y el contenido de huecos de aire en pendiente / contenido de emulsión es menor que para el giratorio. gráficos. También es importante señalar que, al igual que en el caso de los giratorios, también hay un punto de inflexión en cuanto al contenido de agua, ya que del 1 al 3% se puede ver un aumento en la compactabilidad, pero un 4% de agua de premezcla disminuye la compactación lograda. . En este caso la disminución no es tan pronunciada como lo fue con la compactación giratoria, porque el 4% del agua no alcanza un contenido de huecos de aire por encima de los valores del 1% de agua premezclada. Esto se puede explicar porque no existe ningún confinamiento en la parte superior que impida drásticamente el libre movimiento del exceso de agua en el material. Es probable que se deba al hecho de que el impacto se encuentra en un área reducida en la parte superior de la capa y no en toda la superficie, por lo que el agua se opone a una menor resistencia a la compactabilidad que en el caso del compactador giratorio.

Las figuras 3 y 4 muestran otra perspectiva de la compactación del material con compactador giratorio y procedimiento Proctor modificado. En este caso, se representa la densidad aparente y el contenido de huecos de aire para cada contenido de emulsión agregado, respectivamente.

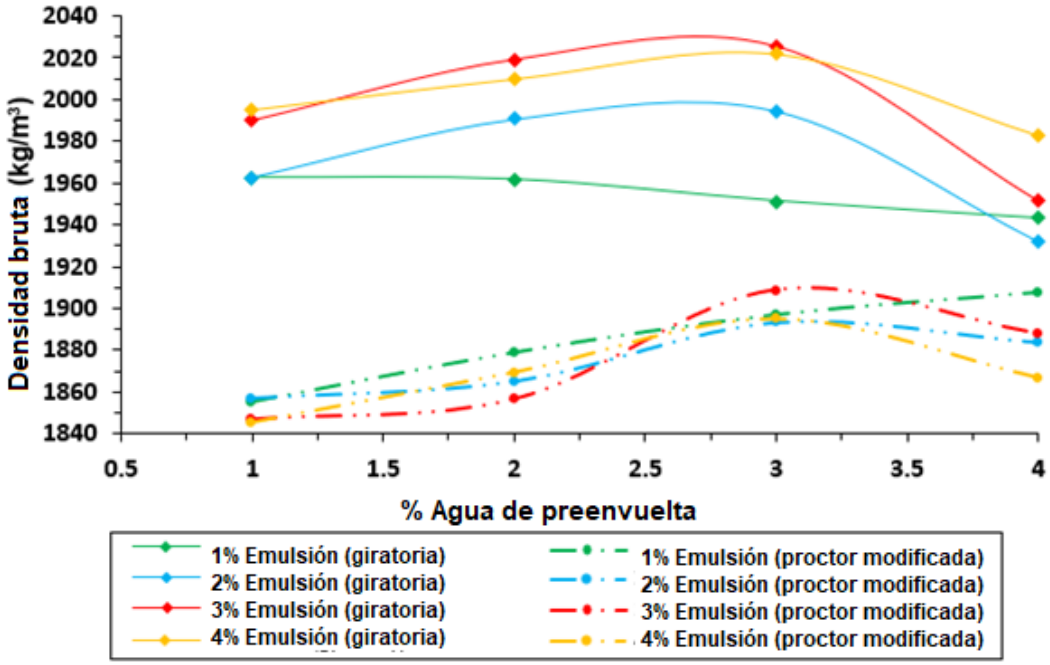

Figura. 3 Comparación de densidad bruta para diferentes contenidos de emulsión en mezclas.

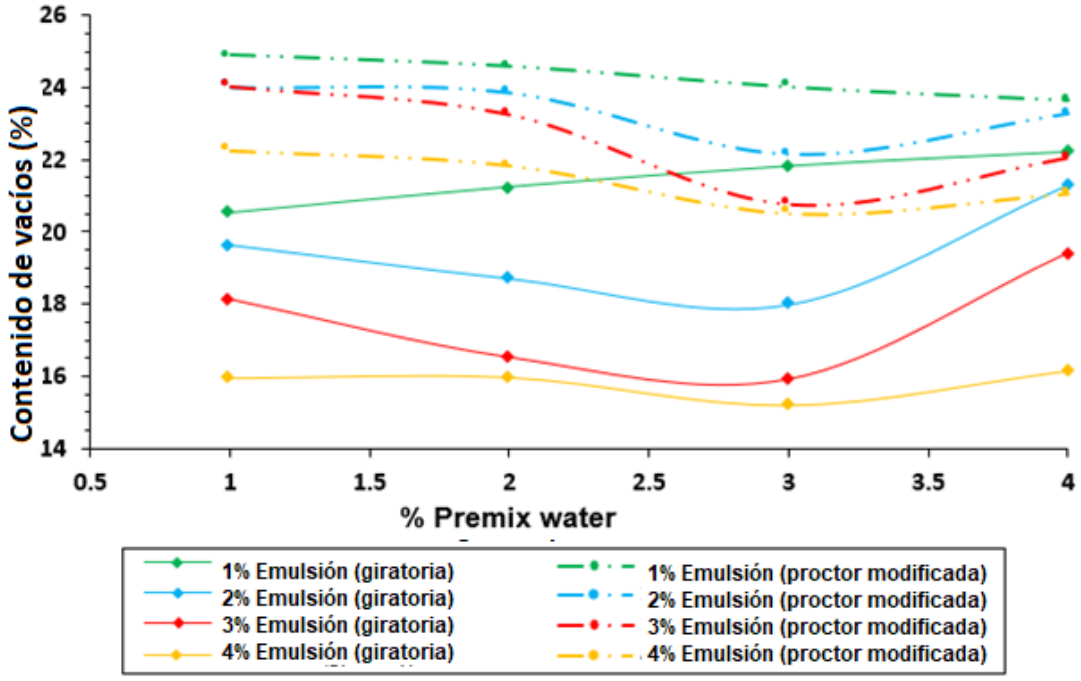

Figura. 4 Comparación de vacíos para diferentes contenidos de emulsión en mezclas.

A partir de esta serie de gráficos, se puede observar el punto en el que el contenido de agua de la premezcla deja de contribuir a la compactabilidad para volverse perjudicial para la eficiencia de la compactación. En ambos métodos, el contenido mínimo de vacíos de aire y la densidad aparente máxima para la mezcla estudiada se ubica al 3% de agua de premezcla. Es importante señalar que en todas las figuras presentadas existe un comportamiento independiente del contenido de agua con el contenido de emulsión, ya que se puede observar que el contenido de emulsión es beneficioso para la compactabilidad, pero el contenido de agua tiene un comportamiento autónomo. Es decir,

independientemente de que la mezcla tenga menor o mayor porcentaje de emulsión, la influencia del contenido de agua sigue su propia tendencia, que en nuestro caso indica ser óptima al 3% de agua de premezcla.

5 Conclusiones

La presente investigación nos ha ayudado a estudiar la influencia de los fluidos en la compactabilidad de la mezcla, que es uno de los factores que hay que controlar estrictamente en campo para obtener el mejor resultado. En nuestro caso, hemos estudiado dos métodos que se utilizan frecuentemente para diseñar mezclas frías con emulsión. Se ha decidido realizar la comparación en base a propiedades volumétricas como el contenido de huecos de aire y la densidad aparente que refleja perfectamente el grado de compactación de las mezclas. A partir de la investigación, fueron obtenidos los siguientes resultados.

- La densidad aparente y el contenido de huecos en mezclas de asfalto reciclado en frío con emulsión muestra verdaderamente el grado de compactación de una mezcla. Si bien el uso de la densidad aparente es el parámetro más utilizado para caracterizar la compactación del suelo, en el caso de mezclas con contenidos crecientes de ligante, el contenido de huecos de aire, calculado con el volumen y las densidades secas máximas, es el parámetro que mejor representa el grado real de compactación.
- También se ha observado que el comportamiento de compactación debido a la influencia del agua de preenvuelta y los contenidos de la emulsión son independientes entre sí en el rango de 2 a 4% de la emulsión, de acuerdo con las tendencias del gráfico. Por esa razón se recomienda el siguiente procedimiento. a) El contenido de agua de la premezcla se determinará en función del menor contenido de huecos de aire o de una mayor densidad aparente, utilizando un contenido de emulsión intermedio fijo (es decir, 3%). b) Una vez establecido el contenido óptimo de agua de la premezcla, se estudiará el aumento del contenido de emulsión. El contenido de emulsión óptimo será el que tenga el contenido de huecos de aire más bajo o en el rango deseado.
- Los valores de vacíos de aire obtenidos por procedimientos Proctor modificados muestran valores más altos que los deseables de alcanzar en el campo. Por otro lado, la compactación giratoria alcanza valores deseables de vacíos de aire y es más sensible a los cambios producidos por el contenido de agua y emulsión de la premezcla. Sin embargo, los resultados obtenidos por ambos métodos del contenido óptimo de agua y emulsión de la premezcla son coincidentes. Por tanto, se considera que se pueden utilizar ambos métodos para determinar el diseño óptimo.
- De lo anterior podemos concluir que ambos métodos pueden ser útiles para estudiar la compactabilidad ya que se muestran resultados coherentes. En el caso del giratorio, los valores que nos da el contenido de vacíos de aire y densidades aparentes se acercan a los deseables a obtener en campo permitiéndonos de esa manera estudiar en laboratorio en condiciones óptimas de compactación. Sin embargo, aunque los valores del contenido de huecos en el aire fueron más altos y las densidades aparentes más bajas que las deseables en el campo, el procedimiento Proctor modificado no puede descartarse como un método válido para el diseño de las mezclas. Los valores óptimos que se obtuvieron para la premezcla de agua en mezcla son prácticamente los mismos que en el caso de la compactación giratoria (3%) y también mostraron un punto de inflexión por exceso de agua. Por lo tanto, se puede decir que la prueba de Proctor se puede utilizar para encontrar el contenido de humedad basándose únicamente en la tendencia del contenido de huecos de aire y no en el valor obtenido. Se recomienda el uso del compactador giratorio para un estudio más realista.

3 Referencias

[1] Polaczyk, P., Han, B., Huang, B., Jia, X., & Shu, X. (2018). *Evaluation of the hot mix asphalt compactability utilizing the impact compaction method*. Construction and Building Materials, 187, 131-137.

[2] Tušar, M., Ramljak, I., & Avsenik, L. (2015). *Validation of results of asphalt compactability determined by impact compactor according to EN 12697-10 and suggested new solutions for better predictions*. Construction and Building Materials, 91, 243-250.

[3] Dubois, V., De La Roche, C., & Burban, O. (2010*). Influence of the compaction process on the air void homogeneity of asphalt mixtures samples*. Construction and Building Materials, 24(6), 885-897.

[4] 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.

[5] Zhang, C., Wang, H., You, Z., & Yang, X. (2016). *Compaction characteristics of asphalt mixture with different gradation type through Superpave Gyratory Compaction and X-Ray CT Scanning*. Construction and Building Materials, 129, 243-255.

[6] Leandro, R. P., Vasconcelos, K. L., & Bernucci, L. L. B. (2017). *Evaluation of the laboratory compaction method on the air voids and the mechanical behavior of hot mix asphalt*. Construction and Building Materials, 156, 424-434.

[7] Hu, W., Jia, X., Huang, B., & Park, H. (2017). *Evaluation of compactability of asphalt mixture utilizing asphalt vibratory compactor*. Construction and Building Materials, 139, 419-429.

[8] Sanchez-Alonso, E., Vega-Zamanillo, A., Castro-Fresno, D., & DelRio-Prat, M. (2011). *Evaluation of compactability and mechanical properties of bituminous mixes with warm additives*. Construction and Building Materials, 25(5), 2304-2311.

[9] Ministerio de Fomento, Ediciones Liteam., "*Dirección General de Carreteras. Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de conservación de carreteras PG-4*." Madrid, 2001.

[10] Yiqiu, T., Haipeng, W., Shaojun, M., & Huining, X. (2014). *Quality control of asphalt pavement compaction using fibre Bragg grating sensing technology*. Construction and Building Materials, 54, 53-59.

[11] Zhao, Y., Gao, Y., Shi, Y., Dong, F., & Wang, Y. (2018*). New method for making and selecting the compaction plan of asphalt pavement based on compaction quality and carbon emissions*. Journal of Cleaner Production, 181, 385-398.