

Evaluation of Marshall stiffness, indirect tensile stress and resilient modulus in asphalt mixes with reclaimed asphalt pavement and copper slag

Evaluación de rigidez Marshall, tracción indirecta y módulo resiliente en mezclas asfálticas con RAP y escoria de cobre

A. Raposeiras ^{1*}, D. Movilla *, A. Vargas **, R. Bilbao *, C. Cifuentes *

* Universidad Austral de Chile, Valdivia. CHILE

** BITUMIX Austral, Puerto Montt. CHILE

Fecha de Recepción: 02/08/2016

Fecha de Aceptación: 12/12/2016

PAG 15-24

Abstract

Asphalt mixes with Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) offer many advantages when reusing this material. But without the adequate treatment, these mixtures present durability problems due to the material's loss of properties over time. The use of copper slag can reduce these problems through its physical-chemical properties, such as highly angular characteristics, lime content in its composition and low silica content, while contributing with friction and strong adhesive characteristics. On the other hand, the amount of copper slag stockpiles and their associated lixiviation are also reduced. This work presents the results obtained in asphalt mixes with RAP percentages from 0 to 40%, combined with copper slag percentages ranging from 0 to 35%. Sixteen (16) combinations of materials were used to prepare Marshall specimens in order to carry out stability and flow tests, indirect tensile strength tests and resilient modulus by diametral compression. The use of copper slag improves the performance of asphalt mixes with RAP. With 15% copper slag amounts by mass, the stability and flow values are stabilized, thereby improving the Marshall stiffness index. The values for indirect tensile strength and resilient modulus with RAP percentages over 20% are also improved, especially in mixtures with high RAP percentage (40%). These results favor the use of RAP in applications that require more demanding parameters.

Keywords: Copper slag (CS), reclaimed asphalt pavement (RAP), copper smelting, asphalt mix, durability

Resumen

Las mezclas asfálticas con RAP (pavimento asfáltico reciclado) tienen muchas ventajas relacionadas a la reutilización de este material. Pero sin el adecuado tratamiento, estas mezclas tienen asociados problemas de durabilidad debido a la pérdida de propiedades que sufre este material con el paso del tiempo. La utilización de escorias de cobre puede ayudar a solventar parte de estos problemas gracias sus propiedades físicas-químicas, como la elevada angulosidad, el contenido de cal en su composición y su bajo contenido en sílice, aportando fricción y adhesividad elevada. A su vez, también se reduce el volumen de escorias de cobre acopiadas y la lixiviación asociada a éstas. Este trabajo muestra los resultados obtenidos en mezclas asfálticas con porcentajes de RAP de 0 a 40% combinados con porcentajes de escoria de cobre del 0 al 35%. Se realizaron 16 combinaciones de materiales con las que se elaboraron probetas Marshall para su análisis mediante ensayos de estabilidad y fluencia, tracción indirecta y módulo resiliente por compresión diametral. La utilización de escorias de cobre provoca una mejora en el comportamiento de mezclas asfálticas con RAP. Con cantidades de escorias de cobre del 15% en volumen, los valores de estabilidad y fluencia se estabilizan, mejorando el índice de rigidez Marshall. También se mejoran los valores de tracción indirecta y módulo resiliente para porcentajes de RAP mayores al 20%, especialmente en mezclas con porcentajes altos de RAP (40%). Estos resultados ayudan a potenciar la utilización de RAP en aplicaciones que requieran parámetros más exigentes.

Palabras clave: Escoria de cobre (EC), pavimento asfáltico reciclado (RAP), fundición de cobre, mezcla asfáltica, durabilidad

1. Introducción

La escoria de cobre (EC) es un subproducto de la fundición del cobre, y tradicionalmente ha sido catalogada como un desecho, provocando su acumulación en vertederos situados cerca de las plantas de fundición. Se generan de 2 a 2,5 toneladas de escoria de cobre por cada tonelada de cobre blíster producido, por lo que, haciendo un cálculo estimado de la cantidad acumulada, solo en el caso chileno ésta se sitúa sobre los 50 millones de toneladas (Sepúlveda, 2006; Sánchez et al., 2004). La escoria de cobre tiene entre sus componentes metales pesados como el cobre, plomo, mercurio o dióxido de azufre, especialmente presentes en los materiales más finos de las escorias, generando problemas de lixiviación asociados a la toxicidad de éstos metales. La escoria de cobre se ha utilizado en procesos muy variados, como son el tratamiento de aguas contaminadas con fenol o su uso en la industria de la construcción, aprovechando su

resistencia al desgaste, angulosidad, elevada densidad y su baja absorción de agua, neutralizando la toxicidad de los metales pesados que posee. Del mismo modo, se ha utilizado como materia prima en la confección de azulejos, ladrillos, hormigón (Goria y Jana, 2003; Havanagi et al., 2009; Nazer et al., 2010) y como sustituto del cemento Portland (Sepúlveda, 2006; Havanagi et al., 2009).

La escoria de acero ha sido empleada con bastante más frecuencia que la escoria de cobre en la construcción de pavimentos flexibles, presentando resultados satisfactorios en su utilización tanto en capas granulares, como en capas asfálticas. Debido a los procesos de generación de las escorias de acero y de cobre, se obtienen propiedades mecánicas similares para ambos materiales, por lo que su comportamiento en mezclas asfálticas se estima parecido. Algunos investigadores han utilizado escorias de cobre como reemplazo de los agregados finos en la fabricación de mezclas asfálticas, obteniendo buenos resultados con incorporaciones de escoria del 5% al 30%. Sin embargo, los resultados de estabilidad de estas mezclas presentan más

¹ Autor de correspondencia:

Universidad Austral de Chile, Instituto de Obras Civiles, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Valdivia, Chile.
E-mail: aitor.raposeiras@uach.cl



variaciones entre las investigaciones existentes, ya que en algunas aumenta esta propiedad al agregar la escoria (Goria y Jana, 2003; Havanagi et al., 2009), mientras que en otras disminuye (Hossamy Khalifa, 2010).

Por otro lado, la utilización de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en la producción de nuevos materiales proporciona ventajas económicas, además de reducir el impacto medio ambiental asociado a su acopio y la utilización de otras materias primas vírgenes, por lo que es una alternativa muy utilizada en la actualidad. Al incluir RAP como agregado en mezclas asfálticas se reduce la utilización de materias primas nuevas (árido y cemento asfáltico), aprovechando los agregados pétreos y el betún contenido en el RAP, y evitando a su vez el depósito de este material en vertederos (Querol y del Pozo, 2011).

Existen estudios previos sobre la incorporación de RAP tanto en la fabricación de hormigones como en mezclas asfálticas. Los resultados obtenidos muestran que no se puede utilizar como sustituto de áridos en hormigones con fines estructurales, sin embargo, en mezclas asfálticas se obtienen resultados comparables a mezclas convencionales siempre que el porcentaje de RAP utilizado sea menor al 20%, disminuyendo a su vez la permeabilidad de la mezcla. Si se incluyen cantidades de RAP superiores, el comportamiento físico de la mezcla asfáltica se modifica, reduciendo la durabilidad y la resistencia final. (Avilés, 2002; Al-Qadi et al., 2012; Valdés et al., 2011; Peña et al., 2011). Al-Qadi et al. (2012), observaron un incremento en la rigidez y la resistencia a la tracción indirecta cuando se añade entre un 40 y 60% de RAP, incrementando entre 60 y 70% los valores de rigidez y tracción indirecta obtenidos en estos ensayos. Además se redujo entre 20 y 50% la capacidad de fluencia de las mezclas a medida que aumenta el contenido del RAP, generando menos fallas por ahuellamiento, pero provocando fallas por fatiga más tempranas (Al-Qadi et al., 2012; Valdés et al., 2011; Peña et al., 2011).

La solución a estos problemas ha sido la utilización de betunes de penetración más blandos o la incorporación de aditivos rejuvenecedores de ligante asfáltico a las mezclas, con el fin de recuperar parte de las características reológicas originales del ligante (Querol y del Pozo, 2011; Avilés, 2002; Al-Qadi et al., 2012; Peña et al., 2011). Esto ha provocado que la rigidez y la resistencia a la tracción indirecta se incrementen en un 25 y 5% respectivamente para incorporaciones de RAP del 50%, manteniendo valores de fluencia similares a una mezcla tradicional (Peña et al., 2011).

A pesar de las soluciones existentes para la incorporación de RAP en las mezclas asfálticas, éstas se utilizan habitualmente en capas inferiores del pavimento,

evitando su utilización como capas de rodadura (Avilés, 2002). Este estudio plantea aprovechar las ventajas naturales de la escoria de cobre mencionadas anteriormente para mejorar el comportamiento de las mezclas asfálticas con elevados contenidos de RAP. Esta solución permite mejorar el comportamiento de las mezclas con RAP gracias a las propiedades friccionantes y cohesivas de la EC que son proporcionadas por la angulosidad de sus partículas y el contenido de cal, y por otro lado permite dar un uso seguro a la EC, ya que se neutraliza la toxicidad de los metales pesados con la película de asfalto que recubre las partículas (Goria y Jana, 2003; Reyes y Rincón, 2013).

2. Metodología

2.1 Materiales y tipos de mezcla asfáltica

Debido a las densidades dispares obtenidas en los diferentes materiales, los agregados de las distintas mezclas asfálticas se dosificaron en volumen, realizando 16 combinaciones de porcentajes de volumen de árido (AR), EC y RAP en las mezclas (Tabla 1), mientras que la incorporación del cemento asfáltico (CA) se realizó respecto al peso tal cual se especifica en normativa AASHTO T245, incluyendo el aporte del ligante contenido en el RAP dentro de esta dotación, lo cual reduce la cantidad de ligante nuevo a incluir.

Los porcentajes de incorporación corresponden al 100% de los agregados, pero no al 100% del volumen de la probeta, ya que este dependerá del porcentaje de CA que debe ser agregado a la mezcla.

A los materiales mencionados anteriormente se debe agregar el CA, que será incorporado en su medida óptima de acuerdo a los procedimientos mencionados más adelante. Para agregar el CA en la mezcla se utilizó el procedimiento estipulado en la AASHTO T-245, en la cual se indica el proceso de fabricación para una probeta tipo Marshall.

Para la fabricación de la mezcla asfáltica se utilizó la granulometría semidensa IV-A-12 de acuerdo al Manual de Carreteras Vol. 5 (Ministerio de Obras Públicas, 2012). Se ha seleccionado esta granulometría por ser una de las más utilizadas tanto en capas de rodadura como en capa binder. Para aprovechar la mayor cantidad de los subproductos recuperados (EC y RAP), se realizó un análisis granulométrico de estos subproductos y se añadieron a la mezcla respetando los porcentajes obtenidos para cada tamiz (Figura 1), añadiendo posteriormente el árido para ajustar la granulometría final al centro de huso de la mezcla semidensa.

Tabla 1. Dosificación en volumen de los agregados en mezcla

Grupo	Tipología, combinación de agregados (%AR - %RAP - %EC)			
	I	II	III	IV
A	100-0-0	85-0-15	75-0-25	65-0-35
B	80-20-0	65-20-15	55-20-25	45-20-35
C	70-30-0	55-30-15	45-30-25	35-30-35
D	60-40-0	45-40-15	35-40-25	25-40-35

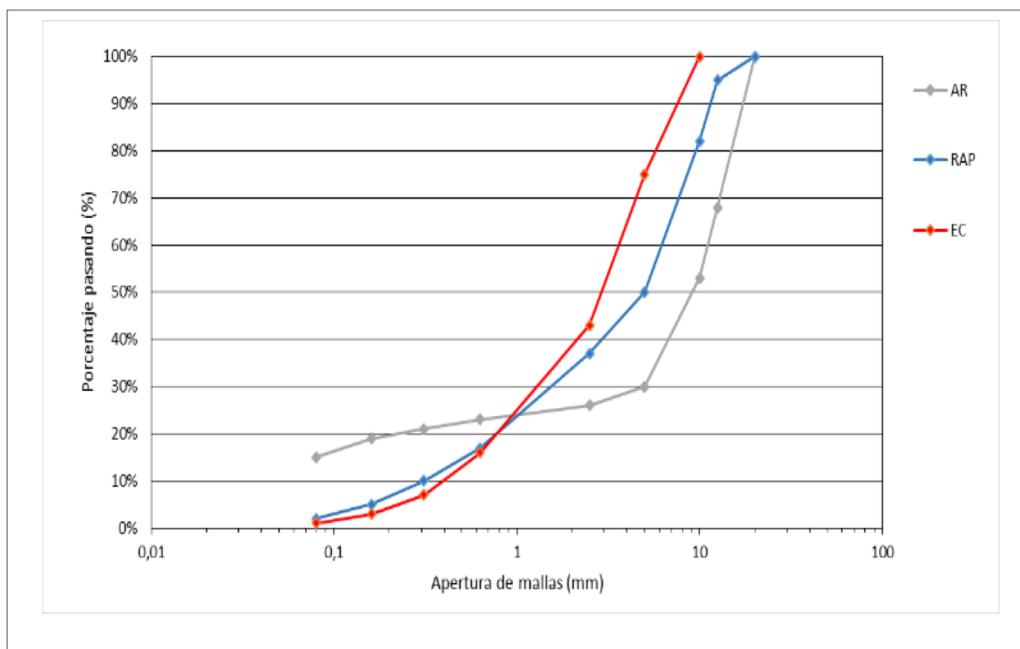


Figura 1. Granulometrías de los materiales

Se pueden diferenciar varias tipologías entre las mezclas evaluadas en esta investigación, según el tipo de agregados que se utilicen. La primera de ellas está compuesta por los tres tipos de agregados (AR, RAP y EC). La segunda tipología se compone de dos tipos de agregados (AR y RAP). Otra de las tipologías incluye AR y EC. Y la última tipología corresponde a la mezcla patrón, incluyendo únicamente AR. Las tres primeras tipologías permitieron evaluar la influencia de la EC en mezclas con y sin RAP, mientras que la tercera tipología permitió la comparación de las otras tipologías con una mezcla convencional.

Una muestra de algunas de estas tipologías se puede apreciar en la Figura 2, donde distinguen los tipos de agregados, resaltando la participación de la EC (zonas grisáceas marcadas en rojo), el cual destaca por su color más oscuro que el resto de los agregados pétreos. No se evidencian mayores diferencias entre las otras dos tipologías de la imagen, salvo que las que contienen RAP se pueden apreciar pequeños gránulos de material fino, los que en el proceso de mezclado se mantuvieron unidos y no se mezclaron con el cemento asfáltico nuevo, provocando cierta segregación.

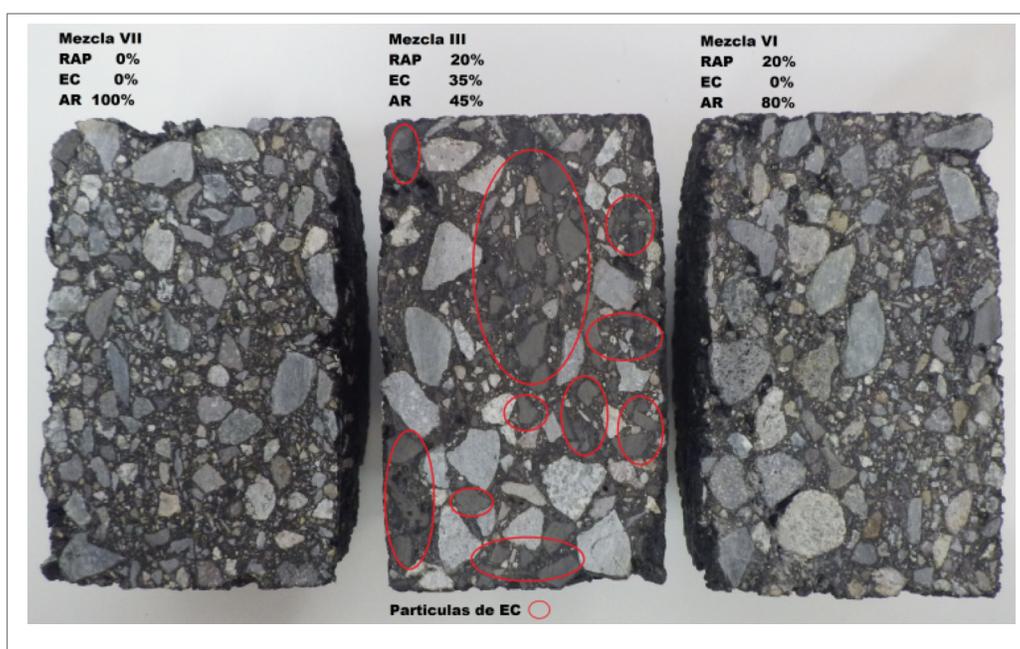


Figura 2. Probetas con los diferentes tipologías de mezclas



2.2 Procesos de fabricación, análisis y ensayo.

Se utilizaron las normativas AASHTO T84 y AASHTO T85 para la caracterización física de los agregados y el betún, y para determinar la densidad y absorción de los agregados finos y gruesos respectivamente. Para la evaluación del desgaste se utilizó la norma AASHTO T96-99 y la cubricidad de las partículas se determinó mediante el procedimiento AASHTO M283. La determinación de la densidad del betún se obtuvo mediante el procedimiento AASHTO T229-97.

Para poder conseguir que las diferentes combinaciones de materiales puedan ser objeto de comparación entre sí, se mantuvieron las proporciones en la granulometría. Tanto para el RAP como para la EC se utilizaron las proporciones originales de cada material en sus diferentes tamices, mientras que las cantidades de AR se añadieron en las proporciones necesarias a cada tamiz para que la granulometría final de la mezcla de los tres materiales se ajuste al centro del huso de la banda granulométrica de diseño (tipo IV-A-12). Se realizó la dosificación en volumen de materiales para las diferentes combinaciones, debido a la diferencia en volumen existente entre los materiales.

Se utilizó la metodología de diseño Marshall descrita en AASHTO T 245 para la confección de las probetas, considerando además que la temperatura de trabajo del RAP debe ser menor debido al betún existente en este material. Para la fabricación de las mezclas, el RAP se acondicionó por separado del resto de materiales para evitar un sobre envejecimiento del ligante incluido en el RAP, sometándolo a temperaturas de 80, 90 y 100°C para las incorporaciones de 20, 30 y 40% de RAP respectivamente, tal como se ha realizado en experiencias anteriores cuando se ha trabajado con RAP en caliente en las que se establece la barrera de los 100°C para evitar la pérdida acelerada de las propiedades del ligante ya envejecido (Alarcón, 2003). El escalonamiento de temperaturas de calentamiento del RAP se establece en función del porcentaje incluido, con el fin de evitar un enfriamiento acelerado de la mezcla durante la compactación debido a la menor temperatura de éste material. El resto de agregados (AR y EC) se acondicionó a temperaturas más altas de las tradicionales, entre 175 y 195°C, para poder alcanzar una temperatura de mezclado y compactación de 155°C, compensando el descenso de temperatura cuando mezclan el AR y la EC con el RAP.

El mezclado se realizó de forma manual y la compactación se hizo con un martillo mecánico Marshall, con 75 golpes por cada cara para lograr el porcentaje óptimo de densidad en la mezcla, según indica la normativa para este tipo de mezclas.

Para establecer el porcentaje óptimo de ligante, se confeccionaron probetas con cuatro porcentajes de adición (4.5; 5.0; 5.5; 6.0) y tres probetas iguales para cada uno de ellos, siguiendo el procedimiento Marshall incluido en la norma AASHTO T 245. Dentro de cada porcentaje se incluyó el aporte de ligante contenido en el RAP, el cual se obtuvo mediante el horno de ignición para las diferentes fracciones del RAP utilizado. Una vez determinado el porcentaje óptimo de ligante, se fabrican mediante el método Marshall las ocho

probetas necesarias de cada combinación destinadas a los ensayos mecánicos, cuatro para los ensayos de estabilidad y fluencia Marshall y otras cuatro para los ensayos de módulo resiliente por compresión diametral y tracción indirecta.

El ensayo de estabilidad y fluencia Marshall se realizó mediante la prensa Marshall con una velocidad de deformación de 50 mm/min de acuerdo a la norma AASHTO T 245. Para el ensayo de tracción indirecta se utilizó la norma AASHTO T 283, aplicando la compresión con una velocidad de deformación de 0.85 ± 0.02 mm/s, por lo que para este ensayo se utilizó también la prensa Marshall, utilizando la mordaza adecuada para la realización de la compresión diametral.

Las probetas destinadas al ensayo Marshall se sumergieron en un baño de agua a 60°C durante 50 minutos, mientras que las probetas destinadas al ensayo de tracción indirecta se mantuvieron a 25°C durante 6 horas antes del ensayo. Las probetas destinadas al ensayo de módulo resiliente se mantuvieron 24 horas a 15°C según lo dispuesto por la norma AASHTO T294-92I.

3. Resultados

La caracterización física del AR y RAP presentó valores dentro del rango habitual, con densidades cercanas entre los 2.6 y los 2.8 g/cm³ tanto para los materiales finos como gruesos, una absorción de agua entre 1.00 y 1.25% y un desgaste cercano al 15,5%. La EC presentó densidades con valores entre 3.6 y 3.8 g/cm³, valores mayores a los obtenidos con los otros materiales debidos al elevado contenido de óxido de hierro. Presentó además una menor absorción de agua debido a su estructura cristalina, que reduce su porosidad, y un desgaste mayor en comparación al resto de agregados, debido a la elevada proporción de aristas, reflejo también de que el 100% de las partículas eran chancadas. Los valores cumplen con las especificaciones requeridas para su utilización como agregados en mezcla asfáltica, de acuerdo al Manual de Carreteras de Chile, Volumen 5 (Ministerio de Obras Públicas, 2012).

Posteriormente se determinó el porcentaje óptimo de ligante para las 16 combinaciones seleccionadas, considerando para ello la cantidad de ligante que aporta el RAP (Tabla 2). Se realizó en diseño Marshall, analizando los valores de densidad, estabilidad y contenido de vacíos (Figuras 3 y 4).

La incorporación de EC provoca un incremento en las densidades, elevando éstas a medida que aumenta la proporción de EC. Este incremento varía de un 3% a un 16% en comparación con probetas sin EC.

Los resultados de estabilidad muestran que la escoria genera rangos de valores de estabilidad menos dispersos que en aquellas mezclas que no poseen dicha adición, propiedad atribuible únicamente a la EC y que ayuda a la generación de mezclas más estables y cercanas a una mezcla convencional. (Figura 3).

Tabla 2. Porcentaje óptimo de ligante según combinaciones

Grupo	Porcentaje óptimo de ligante			
	I	II	III	IV
A	4.9	5.3	5.6	4.9
B	4.9	4.9	5.2	4.7
C	5.1	4.9	5.0	4.5
D	5.1	4.8	5.2	4.9

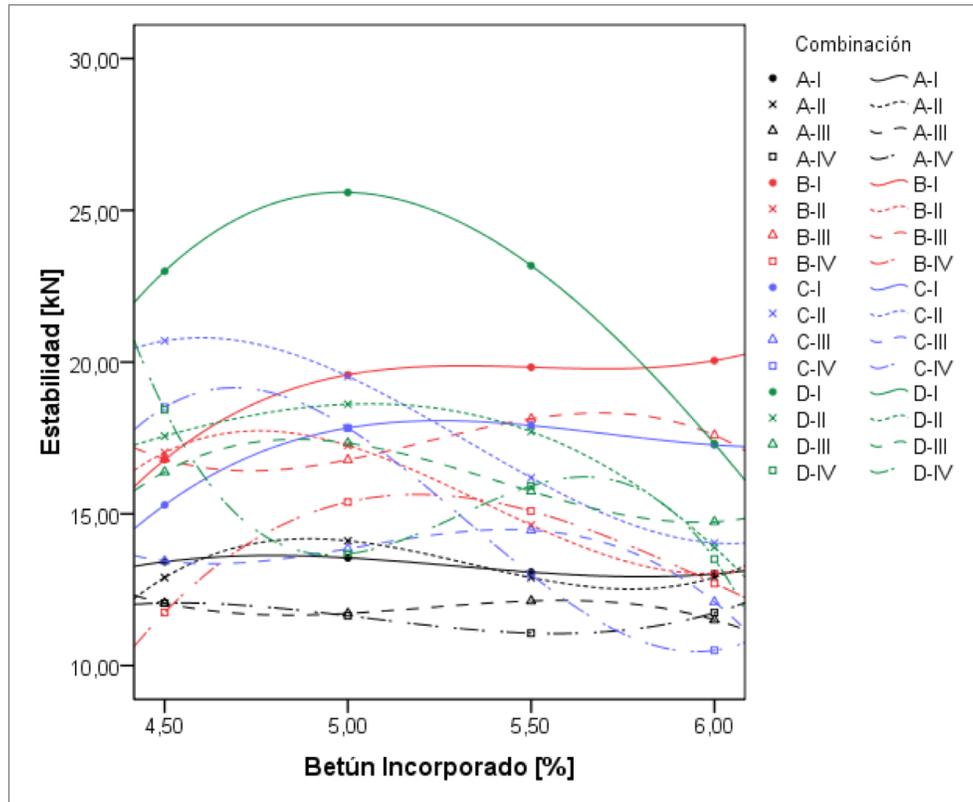


Figura 3. Estabilidad v/s Porcentaje de betún

En el caso de los porcentajes de vacíos (Figura 4), al comparar las mezclas con RAP, se pudo establecer que en las probetas que se adicionó EC se obtienen menores porcentajes de vacíos en las mezclas, los cuales disminuyen de manera aún más drástica con adiciones de ligante superiores al 5%. Se observa que para obtener un porcentaje de vacíos del 5% se necesitan dotaciones de ligante menores, en parte debido a la forma de las partículas. Las diferencias se sitúan desde un 25 a un 40%, permaneciendo por debajo de los valores referenciales de la mezcla tradicional. Sin embargo con el menor contenido de RAP y la mayor participación de EC, estas diferencias solo fueron de un 9%, pero de igual manera quedando bajo los valores de una mezcla tradicional. Estos resultados mantienen a las mezclas construidas con EC dentro del límite de las especificaciones respecto al contenido mínimo de huecos para poder formar parte de una mezcla asfáltica.

Una vez determinado el porcentaje óptimo de betún, se fabricaron las probetas destinadas a los ensayos mecánicos. Los ensayos de estabilidad y fluencia Marshall (Figura 5 y Figura 6) y el índice de rigidez Marshall (Figura 7) muestran varias tendencias. En primer lugar, la incorporación de EC provoca una disminución de los valores de estabilidad si el porcentaje de RAP es elevado. Esta disminución varía entre un 15 y un 35%. Este comportamiento se hace más evidente cuando las cantidades de EC son más bajas.

Si los porcentajes de RAP son más bajos (entre 0 y 30%), la adición de EC provoca ligeros aumentos en los valores de estabilidad, llegando a incrementos del orden del 15%, más acentuado para dotaciones bajas de EC (Figura 5). Los resultados muestran que cualquier adición de EC logra valores superiores a 11.90 kN, obtenidos para la mezcla patrón (0% RAP – 0% EC), y acerca los valores de mezclas con RAP a los resultados de la mezcla patrón.



Estas disminuciones se deben a la baja fricción que generan las caras de las partículas de EC, la cual tiene mayor influencia que la angulosidad de las partículas cuando se sobrepasan los 30°C, momento en el que cambia la

viscosidad del ligante, mostrando un comportamiento más elástico. También existe cierta influencia la presencia de cal en el material fino de la EC, incrementando la adhesividad y reduciendo las pérdidas de estabilidad en las mezclas.

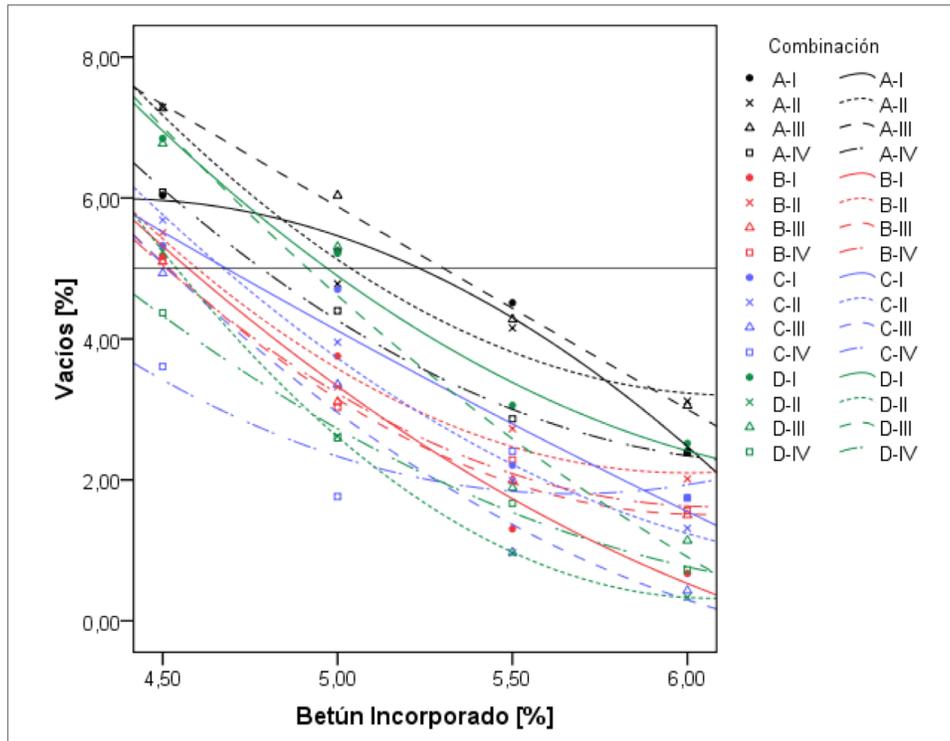


Figura 4. Porcentaje de vacíos en mezcla v/s Porcentaje de betún

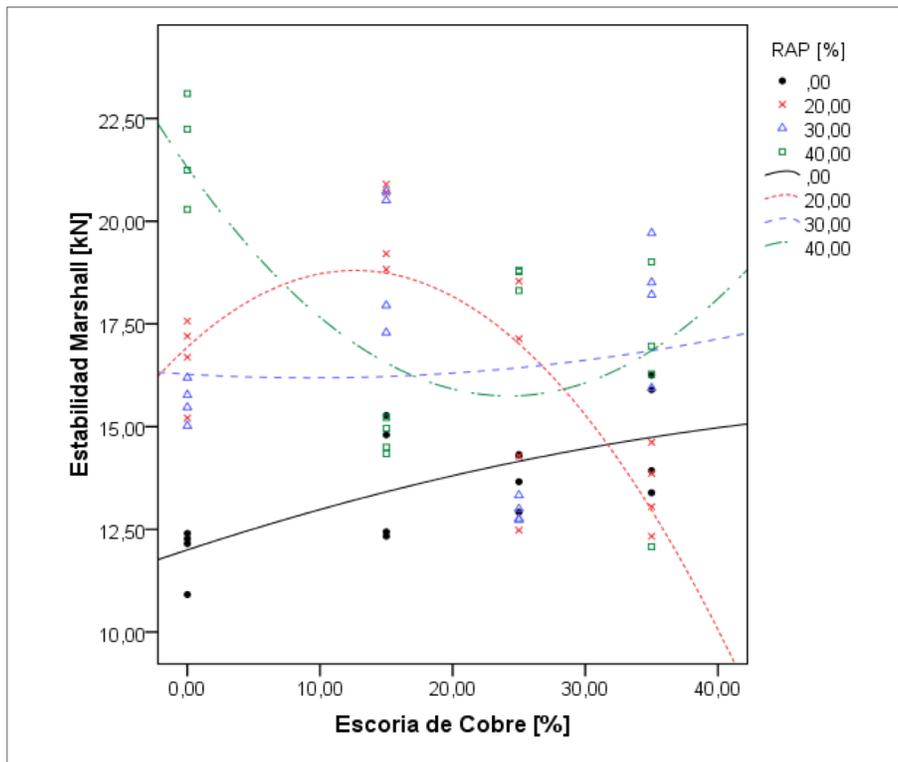


Figura 5. Estabilidad v/s Porcentaje de EC

A su vez los resultados de fluencia (Figura 6) muestran que la EC aumenta los valores de este parámetro, especialmente cuando las cantidades de RAP se sitúan en valores bajos (de 0 a 20%). A medida que se incrementan las cantidades de EC, mayores son los valores de fluencia obtenidos. Para valores de RAP de 20 y 30%, la adición de un 35% de EC acerca los valores de fluencia a los obtenidos con la mezcla patrón, del orden de los 3.0-3.5 mm, y siempre dentro de las especificaciones requeridas para su utilización como capa de rodadura. También se aprecia un buen comportamiento en mezclas con 40% de RAP si la adición de EC es la más baja (15%), ya que la fluencia se ve disminuida, obteniendo valores muy próximos a los de la mezcla patrón. Estos datos demuestran la capacidad adhesiva del contenido de cal que prevalece en las partículas finas de la EC y que

permiten brindar una mayor deformación antes de la rotura en mezclas demasiado rígidas, y aportar resistencia en mezclas demasiado deformables.

Respecto al índice de rigidez Marshall (Figura 7), se determina que la EC destaca por su propiedad adhesiva y capacidad friccionante con el betún a temperaturas máximas de servicio, ya que transforma el índice de rigidez Marshall de mezclas con RAP a valores muy cercanos a los obtenidos con la mezcla de control, particularmente cuando las adiciones de EC superan el 25%, generando rangos de diferencias menores al 10%. Se puede apreciar además que logra que los resultados de rigidez Marshall se estabilicen siempre en valores similares, sin importar la cantidad de RAP que se utilice, acercándolos a una mezcla tradicional.

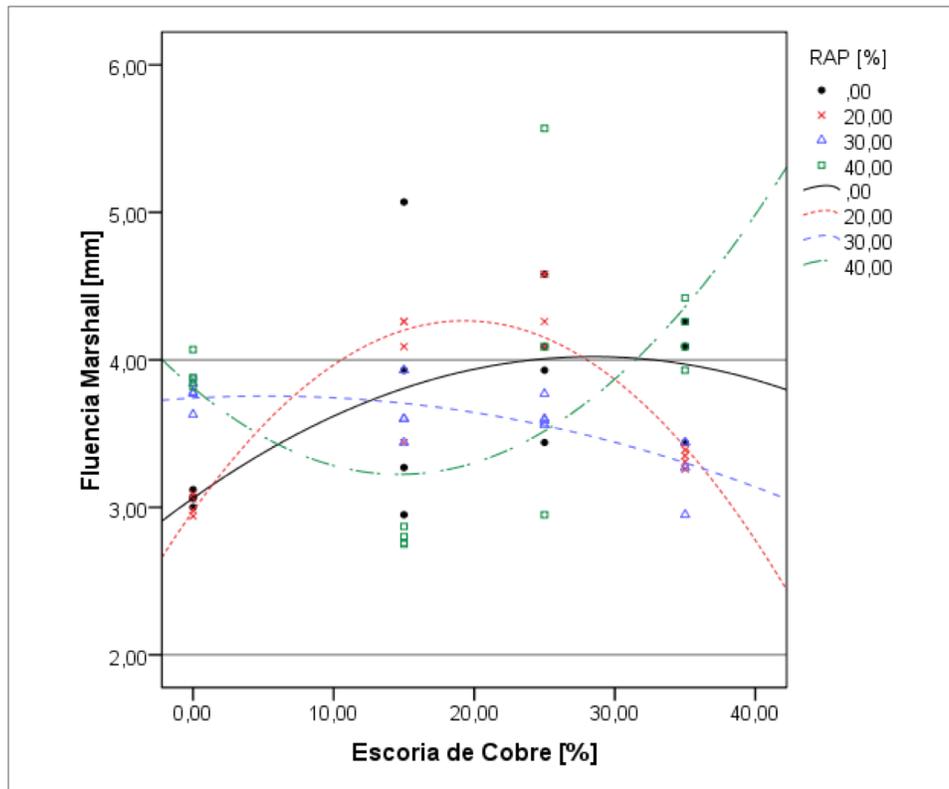


Figura 6. Fluencia v/s Porcentaje de EC



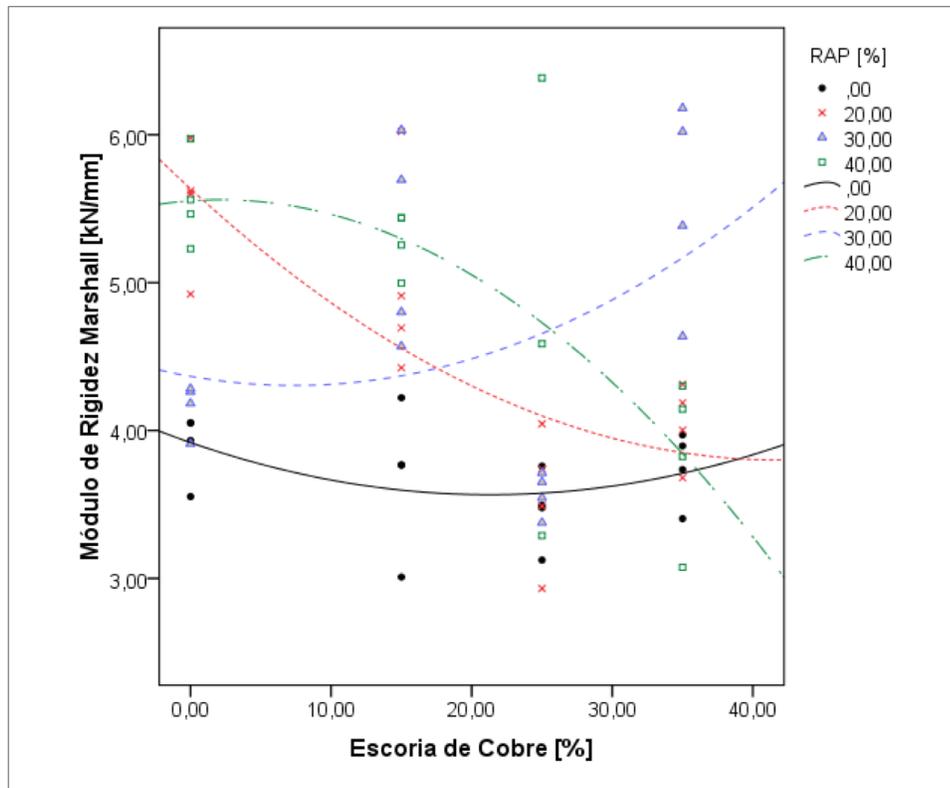


Figura 7. Módulo de Rigidez Marshall v/s Porcentaje de EC

Con las 4 probetas restantes por cada combinación se realizaron los ensayos de resistencia a la tracción indirecta (ITS) y módulo resiliente (Figura 8, Figura 9). Los resultados muestran que al adicionar EC en mezclas con RAP, ésta provoca que los valores de ITS incrementen entre un 20 y 50% en la resistencia. Este incremento se aprecia con valores altos de EC (35%) cuando las dotaciones de RAP son bajas (de 0 a 20%), mientras que en cantidades de RAP más altas (30 y 40%), estos incrementos corresponden a dotaciones de EC más bajas (entre 15 y 25%). Comparando estos resultados con los obtenidos con las mezclas tradicionales, del orden de los 1.10 MPa promedio, significa un aumento de hasta un 75% en la resistencia (Figura 8). Estos aumentos se deben al comportamiento elástico del ligante en temperaturas menores a 30°C, el encaje entre partículas provocado por la angulosidad y grado de chancado de la EC, y la adhesividad extra proporcionada por los contenidos de óxido de cal que componen la escoria, incrementando la resistencia total del conjunto antes de la rotura.

En base a los resultados obtenidos en los ensayos de módulo resiliente, se puede apreciar un incremento en la elasticidad de las mezclas con EC en función de cual sea su combinación con el RAP (Figura 9). Cuanto mayor es la cantidad de RAP en la mezcla, mejores resultados se obtienen disminuyendo la cantidad de EC. Los mejores resultados se obtienen en todas las combinaciones de EC y RAP que suman el 55% del agregado en la mezcla. Todos los resultados en mezclas con RAP y EC superaron los obtenidos en mezclas sin EC y también los resultados de la mezcla convencional, obteniendo valores entre los 10.000 y los 14.000 MPa para las combinaciones óptimas de materiales de cada grupo, superando los 7.000 obtenidos en la mezcla patrón, y los 8.000 de las mezclas con RAP.

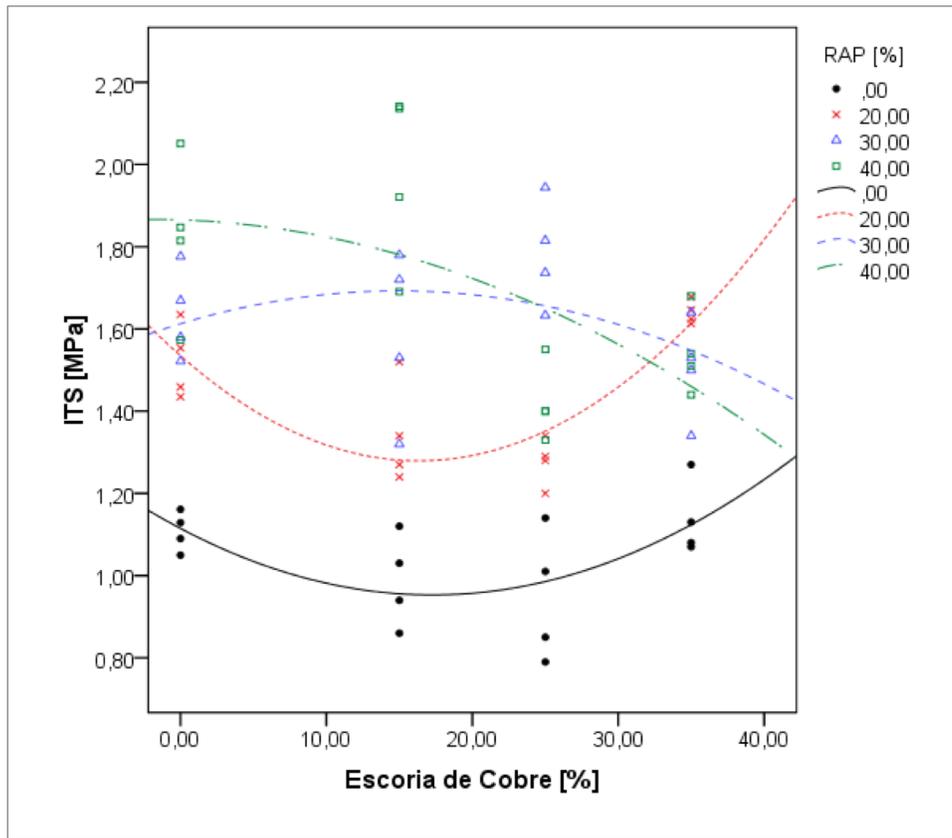


Figura 8. ITS v/s Porcentaje de EC

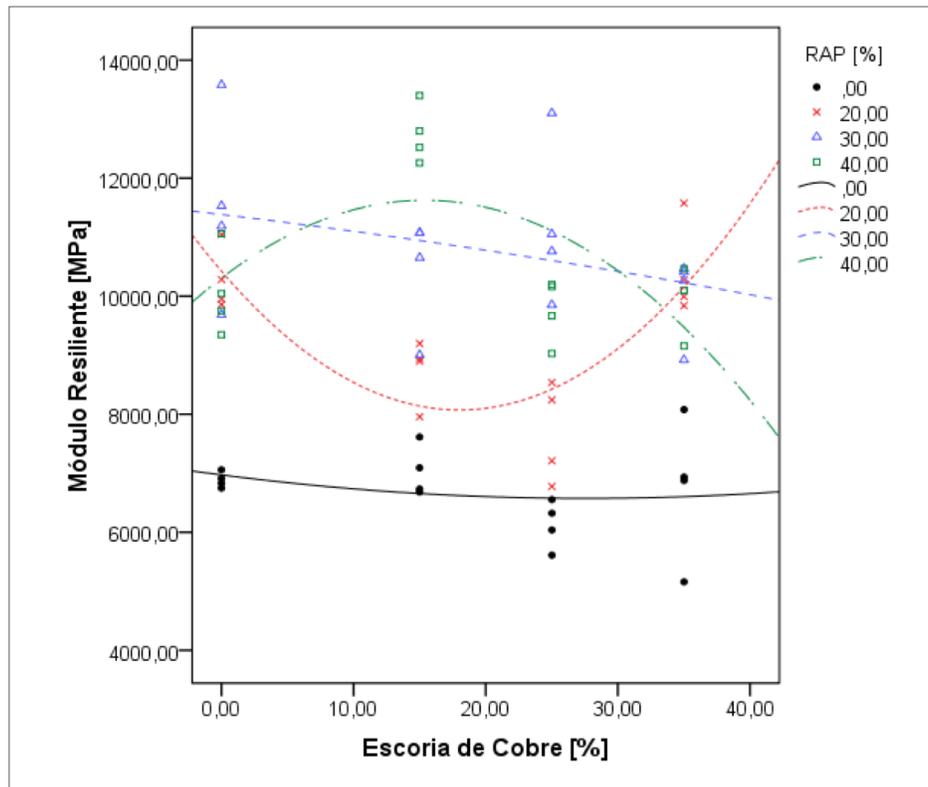


Figura 9. Módulo Resiliente v/s Porcentaje EC



4. Conclusiones

Se obtienen varias conclusiones sobre el efecto que provoca la adición de la EC en reemplazo del agregado AR en mezclas asfálticas en caliente que contienen RAP.

La presencia de la EC provoca un aumento en la densidad de las mezclas cercano al 16%, debido al contenido de hierro incluido en su composición.

Mediante la incorporación de EC se disminuye la estabilidad de las mezclas, obteniendo valores próximos a los obtenidos en la mezcla convencional. Sin embargo, la resistencia a la tracción indirecta se incrementó entre un 20 y 50% dependiendo de la combinación de RAP y EC. Esto muestra la influencia de la temperatura del ensayo en el comportamiento de la EC con el cemento asfáltico, ya que ambos ensayos están realizados a temperaturas diferentes, siendo mayor la temperatura del ensayo de estabilidad que el de tracción indirecta.

A bajas temperaturas, las mezclas con EC aprovechan la angulosidad y cohesividad aportadas por este material, incrementando la resistencia final. A temperaturas elevadas, estas propiedades reducen su influencia, estabilizando las pérdidas de resistencia mediante la acción adhesiva que aporta el componente calizo que forma parte del material fino de la EC.

La adición de EC genera efectos favorables en la fluencia de las mezclas, manteniendo los valores de fluencia en los límites permitidos por norma, y cercanos a la mezcla tradicional. En cantidades elevadas de RAP se obtienen los valores óptimos para un 15 y 25% EC, mientras que para cantidades bajas de RAP se recomienda utilizar 35% EC.

Incluir un 15% de EC en mezclas con cantidades de RAP mayores o iguales al 30% mejora el comportamiento de estas mezclas, limitando la fluctuación en los valores de estabilidad, fluencia y rigidez.

El material fino de la EC, el ligante y la temperatura de ensayo están relacionados directamente, ya que a bajas temperaturas se genera una rigidización del mástico bituminoso, que provoca el descenso en la elasticidad de las mezclas. Este efecto se produce cuando la cantidad de EC+RAP supera el 55%, igualando el comportamiento con mezclas con RAP y sin EC.

La EC mejora el comportamiento de mezclas asfálticas con RAP, considerando que a medida que se incrementa la proporción de RAP se mejoran los resultados disminuyendo la proporción de EC, obteniendo los mejores valores para combinaciones de 55% EC+RAP. Añadir EC a mezclas con porcentajes habituales de RAP mejora el comportamiento a fluencia y tracción de la mezcla sin necesidad de incluir aditivos rejuvenecedores.

5. Agradecimientos

Los resultados presentados pertenecen a investigaciones financiadas por los proyectos FONDECYT Iniciación N° 11140889 (CONICYT) y DID S-2014-27 (DID UACH). Los autores desean agradecer a las empresas BITUMIX S.A y su CDI, Química Latinoamericana, CONAV S.A., GIMACH LTDA., y al Laboratorio Regional de Vialidad de Puerto Montt y de Valdivia por las donaciones de los materiales y por la facilitación de sus dependencias para la confección y realización de parte de los ensayos.

6. Referencias

- Alarcón J. (2003)**, Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta. Tesis doc. Dep. de Infraestructura de Transporte y del Territorio. Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, Esc. Tec. Sup. de Ing. de Caminos Canales y Puertos de Barcelona. 232 p.
- Al-Qadi I., Q. Aurangzeb, S. Carpenter, W. Pine y J. Trepanier (2012)**, Impact of high rap content on structural and performance properties of asphalt mixtures. Illinois Center for Transportation.
- Avilés J. (2002)**, Estudio de la tenacidad de los microaglomerados reciclados en caliente mediante el ensayo btd. efecto del tipo y contenido de betún. Tesis infraestructura de transporte y del territorio. Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, Esc. Tec. Sup. de Ing. de Caminos Canales y Puertos de Barcelona. 121 p.
- Goria B. y R.K. Jana (2003)**, Characteristics and utilisation of copper slag—a review. Resource conservation and recycling. 39(4):299-313.
- Havanagi V., A. Sinsha, P. Prasad, Sitaramanjaneyulu y S. Mathur (2009)**, Copper slag as an alternative material for road construction. Twenty fifth International Conference on Solid Waste Technology and management Philadelphia. Estado Unidos.
- Hossam H. y A. Khalifa (2010)**, Laboratory evaluation of hot-mix asphalt concrete containing copper slag aggregate. J. Mater. Civil. Eng.; 23(6): 879-885.
- Ministerio de Obras Públicas (2012)**, Manual de carreteras. Especificaciones técnicas generales de construcción. Volumen 5.
- Nazer A., O. Pavez, F. Rojas y C. Aguilar (2010)**, Una revisión de los usos de las escorias de cobre. Iberomet XI. X Conamet/sam (del 2 al 5 de noviembre del 2010, viña del mar, Chile).
- Peña J., J. del Pozo, J. Felipe, N. Querol y J. López (2011)**, Reciclabilidad; Límites teóricos y prácticos en el reciclado en caliente en altas tasas. EN: PROYECTO FENIX. Monografía 2; Reducción de los impactos ambientales durante la construcción y explotación de firmes asfálticos. Pp. 15 – 25.
- Querol N. y J. del Pozo (2011)**, Reciclabilidad; Propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas recicladas a altas tasas. EN: PROYECTO FENIX. Monografía 2; Reducción de los impactos ambientales durante la construcción y explotación de firmes asfálticos. Pp. 15 – 25.
- Reyes O. y J. Rincón (2013)**, Influencia de las características del relleno mineral en la resistencia de una mezcla asfáltica. EIA (11): 93-103.
- Sanchez M., F. Parada, R. Parra, F. Marquez, R. Jara, J.C. Carrasco y J. Palacios (2004)**, Management of copper pyrometallurgical slags: giving additional value to copper mining industry. VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts, Cape Town, South Africa. Pp. 543-550.
- Sepúlveda E., C. (2006)**, Utilización de escorias de fundición para la producción de compuestos de hierro. Tesis Ing. Civil Químico. Santiago, Universidad Chile, Fac. Cien. Fis. Y Mat. 93 p.
- Valdes G., J. Perez, R. Miró, A. Martínez y R. Botella (2011)**, Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP). Construction and Building Materials; 25(3):1289-1297.