

Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente incorporando escorias de acero

Stability and flow of hot asphalt mixes incorporating steel slags

Leyner Oswaldo Calva Herrera

Escuela Profesional de Ingeniería Civil
Universidad Señor de Sipán
Chiclayo, Perú
cherreraleyne@crece.uss.edu.pe

Sócrates Pedro Muñoz Pérez

Director, Escuela Profesional de Ingeniería Civil
Universidad Señor de Sipán
Chiclayo, Perú
msocrates@crece.uss.edu.pe

Fecha de recepción: 19/09/2021 - **Fecha de aprobación:** 08/03/2022

RESUMEN

La presente investigación se basó en la innovación y elaboración de una mezcla asfáltica en caliente (MAC), debido al deterioro prematuro de los pavimentos flexibles, y poca capacidad de cumplir con su vida útil. He aquí la necesidad de asegurar una buena calidad de materiales para la mezcla asfáltica y una búsqueda de nuevo material que sea capaz de dar mayor durabilidad y evitar un prematuro deterioro del pavimento. Se evaluó así la incorporación de escoria de acero para el diseño de MAC, con el objetivo de determinar la estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica en caliente incorporando escorias de acero. Para esto, se empleó la metodología Marshall con un porcentaje de escoria de acero respecto al agregado grueso en 0% - 15% - 25% - 50% - 75%. Los resultados obtenidos, en cuanto a calidad de los agregados, cumplieron con los estándares de calidad. Se concluyó que la mezcla asfáltica modificada con la escoria de acero al 15% es la mejor combinación, de igual forma, este porcentaje cumple para tránsito liviano y mediano, al 25% - 50% - 75% solo cumplen para tránsito liviano. Se logró aumentar la estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica al incorporar hasta un máximo de 25% para una MAC respecto a la mezcla de control.

Palabras clave: Mezcla asfáltica, Estabilidad y flujo, Escoria de acero, Método Marshall.

ABSTRACT

The present investigation was based on the innovation and elaboration of a hot asphalt mix (HMA) due to the premature deterioration of flexible pavements, and low capacity to fulfill its useful life. Then, it is recognized the need to ensure a good quality of materials for the asphalt mix and a search for a new material that can give greater durability and avoiding premature deterioration of the pavement. Thus, the incorporation of steel slag for the HMA design was evaluated with the objective to determine the stability and flow of the hot asphalt mixture incorporating steel slags. To achieve this, the Marshall methodology was developed with a percentage of steel slag with respect to the coarse aggregate in 0% - 15% - 25% - 50% - 75%. The results obtained, in terms of quality of the aggregates, complied with the standards of quality. It was concluded that the modified asphalt mixture with 15% steel slag is the best combination, in the same way this percentage complies for light-medium traffic, the remaining combinations (25% - 50% - 75%) only comply for light traffic. It was possible to increase the stability and flow of the incorporated asphalt mixture up to a maximum of 25% for a HMA with respect to the control mixture.

Keywords: Asphalt mix, Stability and flow, Steel slag, Marshall Method.

Introducción

En China, reemplazar la grava natural y arena se ha convertido en el contenido de muchas investigaciones, por lo tanto, manejar eficazmente el uso de escoria de acero para reemplazar el agregado natural es su principal objetivo. En la ingeniería vial, la escoria de acero puede reemplazar parcialmente el agregado natural para mejorar la resistencia al desgaste del hormigón (Yan y Hao, 2019). Los problemas asociados con la fuerza, la durabilidad y el rendimiento de los pavimentos dependen no solo de las características del aglutinante, sino también del agregado utilizado (Ali, *et al.*, 2019). En China, el 90% del pavimento de asfalto está diseñado y colocado de acuerdo con el principio de clasificación densa (Fan, Pan, Wei, Lu, y Fang, 2019). Teniendo en cuenta que varios millones de toneladas de escoria de acero se producen anualmente y causan riesgos ambientales, en Irán se busca usar la escoria de acero como agregado grueso en las mezclas asfálticas en caliente (Alinezhad y Sahaf, 2019). Este desperdicio de material generalmente tiene propiedades físicas interesantes y composición mineralógica y química, que pueden ser útiles como agregado granular en la producción de mezcla de asfalto en caliente (Rondón-Quintana, Ruge-Cárdenas, y Muniz, 2018).

El rápido desarrollo de la industria pesada en Vietnam ahora considera la escoria de acero un desecho sólido normal o no perjudicial, y ha sido estudiado para su reutilización en la industria de la construcción (Nguyen, Lu, y Le, 2018). En China, por cada tonelada de acero bruto producido, 8% - 15% producirá escoria, por lo que, actualmente, la escoria de acero de China acumula alrededor de mil millones de toneladas. Por lo tanto, si no se usa razonablemente ocupará muchos recursos de la tierra y causará contaminación ambiental (Bing, Biao, Zhen, Hanchi, y Hongbo, 2019).

La escoria de acero puede verse como una alternativa potencial de agregados naturales y así ahorrar una gran parte de recursos naturales y proteger el medio ambiente (Rahmawati y Saputro, 2018). En Malasia, el vertido de escoria de acero es el método de eliminación más convencional, debido a esto, no solo causa escasez del vertedero, sino que el medio ambiente se verá afectado (Lim, Chew, Choong, Tezara, y Yazdi, 2016). En Indonesia, se ha mejorado el uso de escoria de acero como reemplazo de agregado

con fines constructivos para así reducir el costo de construcción y mantenimiento de infraestructuras existentes (Hanif, 2019).

Brasil es el mayor productor de escoria de acero en América Latina con el 52,2%, es así necesario fomentar el uso del subproducto que aquí se genera como sustituto de agregado natural (Alves, Alexandre, Rodrigues, Fernandes, y Bezerra, 2020; Giordano, Leão, Dos Santos, Andrade, y Cecche, 2019). En Colombia, el uso de sobrantes industriales en distintos procesos debe centrarse en el desarrollo eco amigable al ambiente, se usa así escoria de acero como agregado grueso para fabricar mezclas calientes de asfalto (López-Díaz, Ochoa-Díaz, y Grimaldo-León, 2018). Estos materiales poseen propiedades químicas y físicas aptos para ser usados en rehabilitación de carreteras (Rondón-Quintana, Muniz-De-Farias, y Reyes-Lizcano, 2018), pues el riesgo ambiental que genera el depósito de escoria de acero en vertederos conlleva a su uso como agregado grueso en las mezclas asfálticas calientes (Shiha, El-Badawy, y Gabr, 2020).

En Turquía, el uso de escoria de acero como agregado grueso en la mezcla asfáltica en caliente, y evaluado por estabilidad y fluencia de Marshall, mejora dichas propiedades mecánicas (Ahmedzade y Sengoz, 2008), esta también proporciona una resistencia significativa a corto plazo, por lo tanto, podría considerarse una mezcla bituminosa duradera en comparación con una mezcla tradicional (Amelian, Manian, Mahdi, y Goli, 2018).

La incorporación simultánea de escoria de acero es una opción económica y respetuosa con el medio ambiente, con una calidad comparable e incluso de mejor rendimiento respecto a la mezcla asfáltica tradicional (Fakhri y Ahmadi, 2017; Goli, Hesami, y Ameri, 2017). Finalmente, la adición de la escoria de acero aumenta la estabilidad de Marshall y es satisfactoria, además, por su textura rugosa, mejora la adhesión con el asfalto y la resistencia al corte (Martinho, Picado-Santos, y Capitaio, 2018; Yan y Hao, 2019).

Por todo lo dicho, se ha encontrado que un diseño experimental con el 15% de escoria de acero incorporado en una mezcla asfáltica posee una estabilidad de 12,536 kN. Por lo tanto, resulta que cumple lo que la norma ASTM D - 1559 establece, en

la cual se indica que la estabilidad debe cumplir un mínimo de 8,15 kN (Pérez, 2018). Adicionalmente, se ha encontrado que, al incorporar un 15% de escoria de acero, la resistencia a la formación de surcos es 1,24 veces mayor que la mezcla tradicional, en la estabilidad es 1,8 veces mayor a la mezcla tradicional y muestra mejor resistencia al agrietamiento (Kim, Heang, Kim, y Kim, 2018). Para adiciones superiores al 25% de escoria de acero, los valores de estabilidad Mashall alcanzan niveles similares a la mezcla patrón, y mejora los resultados de resistencia respecto a la mezcla patrón (Raposeiras, Vargas, Movilla, y Castro, 2016; Tamayo y Bautista, 2020).

Por lo mencionado anteriormente, la presente investigación tiene el objetivo de evaluar la estabilidad y flujo de una mezcla asfáltica en caliente incorporando escorias de acero.

Metodología

Materiales

Agregados

Los agregados utilizados para la presente investigación vistos en la Figura 1, tanto agregado grueso como fino fueron de la cantera del gobierno regional de Lambayeque – Perú. Los agregados constituyen aproximadamente 88% a 96% en peso y volumen de la mezcla total.

El efecto del agregado sobre las características de las mezclas bituminosas es de primordial importancia. Uno de los aspectos clave de los agregados que afectan la estabilidad y las propiedades de trabajo de una mezcla es la gradación. Los agregados utilizados se clasifican esencialmente como agregados gruesos y finos según su tamaño. Los agregados que son menores de 50 mm y mayores de 2,36 mm de tamaño se consideran agregados gruesos, mientras los agregados menores de 2,36 mm y mayores de 0,075 mm de tamaño son el agregado fino (Gupta y Bellary, 2018).



Figura 1. Lavado de agregados para su correcta granulometría

Escoria de acero

En la presente investigación se usó la escoria de acero Figura 2 que se produce como un subproducto durante la oxidación de acero en un horno de arco eléctrico. Esta será incorporada en relación con el peso del agregado grueso en porcentajes de 15%, 25%, 50%, 75%. Este subproducto, que consiste principalmente en carbonato de calcio, se descompone en tamaños más pequeños para usarse como agregados en asfalto y concreto. Son particularmente útiles en áreas donde el agregado de buena calidad es escaso (Adilah, Mohamed, Ramadhansyah, Rokiah, y Hainin, 2020).



Figura 2. Cuarteo de escoria de acero para su correcta granulometría

Mezcla asfáltica

El asfalto es un elemento cementante de tonalidad negro y solidez cambiante, cuya dureza dependerá a que temperatura se trabaje. En medida que la temperatura se eleva, el asfalto sólido o semisólido pasa a un estado líquido. La mezcla en caliente desarrollada se produce a una temperatura de 135°C a 180°C, para esto se empleó agregado grueso, agregado fino, cemento asfáltico 60/70, escoria de acero con los parámetros establecidos en el Cuadro 1, Cuadro 2 y Cuadro 3.

Filler

El material de relleno es un material no plástico con un mínimo del 75% del peso que pasa a través del tamiz N° 200 (0,075 mm) (Irwanto y Qadar, 2019).

Procedimiento

El proceso de la investigación se desarrolla mediante los siguientes pasos establecidos en la Figura 3. La metodología empleada para determinar la estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica fue Marshall, así mismo el control de la calidad de los agregados debe cumplir con los parámetros establecidos en la ASTM D-1559, desde el propósito de la investigación hasta el análisis final de los resultados obtenidos.

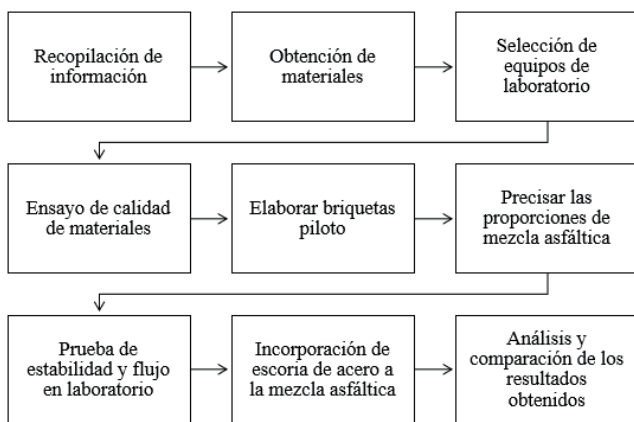


Figura 3. Diagrama de flujo de la investigación

Resultados y discusión

Propiedades físicas de los agregados

El agregado fino, agregado grueso y escoria de acero evaluado cumplió con los parámetros mínimos y máximos de las normas ASTM como se muestra en el Cuadro 1, Cuadro 2 y Cuadro 3, respectivamente, lo cual comprueba un correcto control de calidad por cada ensayo pertinente. Para la elaboración de las mezclas asfálticas se muestra su curva granulométrica en la Figura 4, Figura 5 y Figura 6.

Cuadro 1. Resultados realizados al agregado fino

| Ensayo a realizar | Resultado | Requerimientos |
|----------------------------|-----------|---------------------------|
| Equivalente de arena | 61% | 45% mín. – ASTM D - 2419 |
| Índice de plasticidad | 2,39 % | 4% máx. – ASTM D - 4318 |
| Sales solubles totales | 0,24% | 0,5% máx. – ASTM - 2216 |
| Absorción | 0,48% | 0,5% máx. – ASTM D - 420 |
| Adhesividad (Riedel weber) | 4,01% | 4% mín. – ASTM D: E 11-70 |

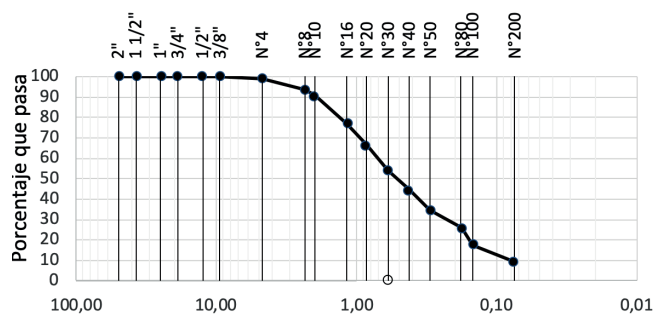


Figura 4. Curva granulométrica del agregado fino

Cuadro 2. Resultados realizados al agregado grueso

| Ensayo | Resultado | Requerimiento |
|---|-----------|---------------------------|
| Abrasión en la máquina de Los ángeles | 22,2% | 40% máx. – ASTM C - 131 |
| Pérdida de masa por inmersión en sulfato de Mg. | 6,53% | 12% máx. – ASTM C -88 |
| Partículas chatas y alargadas | 8,9% | 15% máx. – ASTM 4791 |
| Partículas fracturadas | 26/68 | 65/40 – ASTM D – 5821 |
| Sales solubles | 0,16% | 0,5% máx. – ASTM D - 2216 |
| Absorción | 0,98% | 1% máx. – ASTM C – 127 |
| Adherencia | 95 | 95 + - ASTM D-4541 |

Cuadro 3. Resultados de la caracterización de la escoria de acero

| Ensayo | Resultado | Requerimiento |
|-------------------------------|-----------|--------------------------|
| Abrasión de los ángeles | 26,34% | 40% máx. – ASTM C – 131 |
| Pérdida en sulfato de Mg | 4,38% | 12% máx. – ASTM C – 88 |
| Partículas chatas y alargadas | 0,21% | 15% máx. – ASTM 4791 |
| Partículas fracturadas | 0/0 | 65/40 – ASTM D – 5821 |
| Sales solubles | 0,07% | 0,5% máx. – ASTM D -2216 |
| Absorción | 2,4% | 1% máx. – ASTM C-127 |
| Adherencia | 95 | 95 + - ASTM C - 127 |

En la escoria de acero se debe tener en consideración el tema de absorción: los resultados determinan el 1,4% de absorción, superando el valor máximo permitido de 1%, debido a la alta porosidad del material.

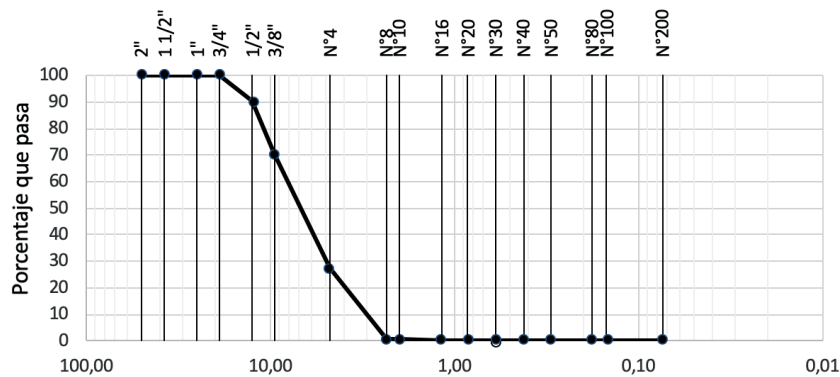


Figura 5. Curva granulométrica del agregado grueso

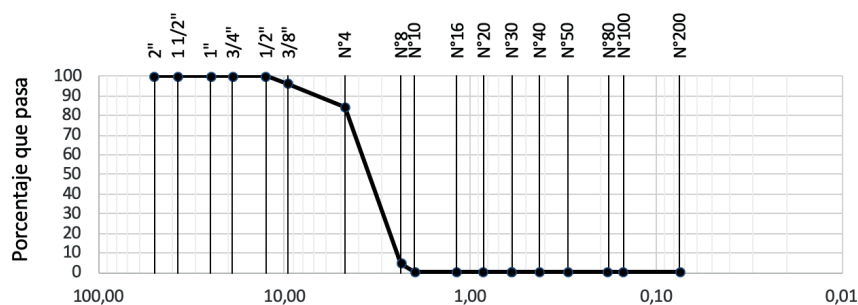


Figura 6. Distribución granulométrica de la escoria

Metodología de Marshall estabilidad y flujo

La estabilidad de Marshall muestra la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir empujones y surcos. El flujo muestra la capacidad de la mezcla asfáltica para Resistir el asentamiento gradual y la deformación sin agrietarse (Veropalumbo, Viscione, y Formisano, 2018).

El Cuadro 4 muestra los requisitos de la metodología Marshall para mezclas asfálticas en caliente.

Cuadro 4. Requisitos del Marshall para las mezclas según la especificación 423 Pavimento Asfáltico en Caliente

| Parámetro de diseño | Clase de mezcla | | |
|---|-----------------|---------|---------|
| | A | B | C |
| Marshall | | | |
| Compactación, número de golpes por lado | 75 | 50 | 35 |
| Estabilidad (mínimo) | 8,15 kN | 5,44 kN | 4,53 kN |
| Flujo 0,01" (0,25 mm) | 8-14 | 8-16 | 8-20 |
| Porcentaje de vacíos con aire (1) | 3-5 | 3-5 | 3-5 |
| Vacíos en el agregado mineral | | | |
| Inmersión - compresión | | 2,1 | 1,4 |
| Resistencia a compresión MPa min | 2,1 | 2,1 | 1,4 |
| Resistencia retenida % (min) | 75 | 0,6-1,3 | 0,6-1,3 |
| Relación polvo - asfalto (2) | 0,6-1,3 | | |
| Relación estabilidad flujo (kg/cm) | 1700-4000 | | |
| Resistencia conservada en la prueba de fracción indirecta | 80 Min | | |

Resultados de la mejor combinación de agregado con el 15% de escoria de acero

Según los análisis granulométricos y la combinación de los mismos, dichos porcentajes en la sustitución con 15% está dentro de los límites de la franja granulométrica MAC-2 siendo la combinación de Agregado Grueso 45,9% + Agregado Fino 44%, la que se considera como la mejor por cumplir con los parámetros establecidos en la ASTM D -1559 y cumplir para el ensayo de tránsito liviano y mediano, tal como se muestra en el Cuadro 5 y su combinación granulométrica en la Figura 7.

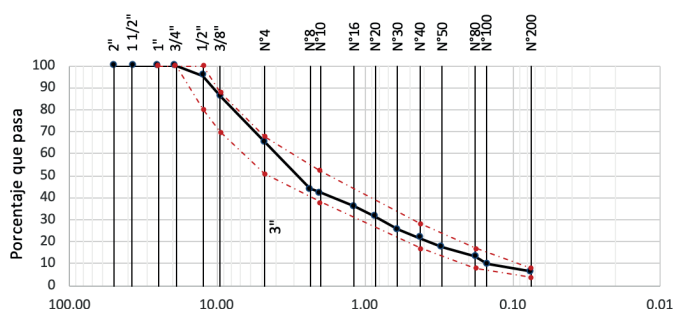


Figura 7. Curva granulométrica 15% escoria para MAC-2

A continuación, se muestran los resultados para cada clase de tránsito respecto a la mezcla asfáltica tradicional y con incorporación de escoria de acero en 15%, 25%, 50% y 75 % con porcentajes óptimos. En el Cuadro 5 (tránsito liviano), el Cuadro 6 (tránsito mediano) y Cuadro 7 (tránsito pesado), se puede ver un incremento de los valores obtenidos, dependiendo del contenido de escoria de acero.

Cuadro 5. Influencia de la sustitución de agregado grueso por escoria en el Marshall para tránsito liviano

| Tránsito liviano | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------------------|
| Contenido de escoria de acero | 0% | 15% | 25% | 50% | 75% | Especificaciones técnicas ASTM |
| Vacíos (%) | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 3-5% |
| VMA (%) | 17,02 | 17,02 | 17,02 | 17,02 | 17,02 | |
| VLCA (%) | 72,59 | 72,59 | 72,59 | 72,59 | 72,59 | 70-80% |
| Flujo (mm) | 13,59 | 13,59 | 13,59 | 13,59 | 13,59 | Entre 8 – 20 |
| Estabilidad corregida (kN) | 12,87 | 12,94 | 14,60 | 15,68 | 15,46 | Mín. 4,53 kN |
| Rel. Estabilidad/Fluencia (kg/cm) | 2998,4 | 3004,9 | 3555,9 | 3997,1 | 3741,3 | 1700-4000 |

Cuadro 6. Influencia de la sustitución de agregado grueso por escoria en el Marshall para tránsito mediano

| Tránsito mediano | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------------|
| Contenido de escoria de acero | 0% | 15% | 25% | 50% | 75% | Especificaciones técnicas |
| Vacíos (%) | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 3-5% |
| VMA (%) | 17,02 | 17,02 | 17,02 | 17,02 | 17,02 | |
| VLCA (%) | 72,59 | 72,59 | 72,59 | 72,59 | 72,59 | 65-78% |
| Flujo (mm) | 13,59 | 13,59 | 13,59 | 13,59 | 13,59 | Entre 8 – 16 |
| Estabilidad corregida (kN) | 14,14 | 14,76 | 19,23 | 19,73 | 17,02 | Mín. 5,44 kN |
| Rel. Estabilidad/Fluencia (kg/cm) | 3618,3 | 3802,5 | 4432,3 | 5004,3 | 5252,7 | 1700-4000 |

Cuadro 7. Influencia de la sustitución de agregado grueso por escoria en el Marshall para tránsito pesado

| Tránsito pesado | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|---------------------------|
| Contenido de escoria de acero | 0% | 15% | 25% | 50% | 75% | Especificaciones técnicas |
| Vacíos (%) | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 3-5% |
| VMA (%) | 17,02 | 17,02 | 17,02 | 17,02 | 17,02 | |
| VLCA (%) | 72,59 | 72,59 | 72,59 | 72,59 | 72,59 | 65-75% |
| Flujo (mm) | 13,59 | 13,59 | 13,59 | 13,59 | 13,59 | Entre 8 – 14 |
| Estabilidad corregida (kN) | 13,59 | 17,98 | 19,94 | 24,33 | 24,33 | Mín. 8,15 kN |
| Rel. Estabilidad/Fluencia (kg/cm) | 3306,1 | 5336,8 | 5867,9 | 6004,9 | 792,1 | 1700-4000 |

En los resultados del trabajo se pudo apreciar que la escoria de acero incorporada en un 15% mantiene el flujo y mejora la estabilidad respecto a la mezcla patrón, en sus tres categorías tránsito liviano, mediano y pesado tal como se muestra en los cuadros 5, 6 y 7, que coincide con las investigaciones de Kim, *et al.* (2018) y Pérez (2018). El 15% de incorporación de escoria de acero se determina que es la mejor, por ser más estable y cumplir con los parámetros establecidos para un tránsito liviano y mediano; por su parte, Raposeiras y colaboradores (2016) y Tamayo y Bautista (2020) concluyen que la mejor combinación de escoria de acero es al 25%, sin embargo, en esta investigación consideramos que 25% cumple solo para tránsito liviano y satisface al límite la franja granulométrica MAC-2 (mezcla asfáltica en caliente), la cual su granulometría debe estar entre el tamiz $\frac{3}{4}$ " y el tamiz N° 200; por lo que se considera que el 15% de incorporación de escoria de acero como la mejor combinación granulométrica.

Se concluye también que se debe tener un óptimo control de la calidad de los agregados, pues estos son determinantes para la veracidad de los resultados.

Conclusiones

Se concluye que:

- El control de calidad de los agregados (agregado fino, agregado grueso) y escoria de acero, cumplen con todos los parámetros que establece la construcción de mezclas asfálticas en caliente (ASTM D-1559).
- De los porcentajes incorporados, resulta que la incorporación del 15% de escoria es la mejor combinación granulométrica para una MAC-2, pues la mezcla asfáltica tiende a ser más estable respecto a la tradicional y cumple los parámetros de un tránsito liviano y mediano; y el 25% es el máximo límite pues si se pasa de este porcentaje no se cumple con el huso granulométrico MAC-2 y solo satisface los parámetros para un tránsito liviano.

- La incorporación de escoria al 15% mejora la estabilidad y el flujo se mantiene, por lo tanto, cumple para tránsito liviano y mediano; el 25% mejora la estabilidad y el flujo se mantiene, por lo tanto, cumple para tránsito liviano, mientras que el 50% y 75% cumple para tránsito liviano; sin embargo, no cumple con la franja granulométrica para MAC-2.

Referencias

- Adilah, A. N., Mohamed, S. A., Ramadhansyah, P. J., Rokiah, O., y Hainin, M. (2020). The influence of steel slag as alternative aggregate in permeable concrete pavement. *Materials Science and Engineering*, 712, 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/712/1/012011
- Ahmedzade, P., y Sengoz, B. (2008). Evaluation of steel coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1 a 3), 300-305. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.09.105
- Ali, J., Abdul, H., Mohd, S., Mohd, S., Mohd, W., y Mohd, Y. (2019). Characterization of industrial by-products as asphalt paving material. *Earth and Environment Science*, 220, 012012. DOI: 10.1088/1755-1315/220/1/012012
- Alinezhad, M., y Sahaf, A. (2019). Investigation of the fatigue characteristics of warm stone matrix asphalt (WSMA) containing electric arc furnace (EAF) steel slag as coarse aggregate and Sasobit as warm mix additive. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00265. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00265
- Alves, F., Alexandre, D., Rodrigues, A., Fernandes, E., Bezerra, A. E. (2020). Mechanical properties of mortars with replacement of natural sand by steel slag BSSF (baosteel's slag short flow). *Matéria*, 25(1), 18. DOI: 10.1590/S1517-707620200001.0887
- Amelian, S., Manian, M., Mahdi, S., y Goli, A. (2018). Moisture sensitivity and mechanical performance assessment of warm mix asphalt containing By-Product steel slag. *Journal of Cleaner Production*, 176(1), 329-337. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.120

- Bing, L., Biao, T., Zhen, M., Hanchi, C., y Hongbo, L. (2019). Physical and chemical properties of steel slag and utilization technology of steel slag at home and abroad. *Earth and Environmental Science*, 242(3), 032012. DOI: 10.1088/1755-1315/242/3/032012
- Fakhri, M., y Ahmadi, A. (2017). Recycling of RAP and steel slag aggregates into the warm mix asphalt: A performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 147(30), 630-638. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.117
- Fan, S., Pan, R., Wei, G., Lu, J., y Fang, S. (2019). Gradation Design and Performance of OGFC-13 Steel Slag Permeable Asphalt Concrete. *Materials Science and Engineering*, 688, 7. DOI: 10.1088/1757-899X/688/2/022017
- Giordano, C., Leão, B., Dos Santos, G., Andrade, P., y Cecche, R. (2019). Use of electric arc furnace slag for producing concrete paving blocks. *Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, 19(2), 21-32. DOI: 10.1590/s1678-86212019000200305
- Goli, H., Hesami, S., y Ameri, M. (2017). Laboratory evaluation of damage behavior of warm mix asphalt containing steel slag aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(6) 04017009. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001832
- Gupta, L., y Bellary, A. (2018). Comparative study on the behavior of bituminous concrete mix and warm mix asphalt prepared using lime and zycotherm as additive. *Materials today: PROCEEDINGS*, 5(1), 2074-2081. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.09.203
- Hanif (2019). Use of steel slag with variations of fas compressive strength of concrete. *Materials Science and Engineering*, 536(1), 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/536/1/012029
- Nguyen, H. Q., Lu, D. X., y Le, S. D. (2018). Investigation of using steel slag in hot mix asphalt for the surface course of flexible pavements. *Earth and Environmental Science*, 143, 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/143/1/012022
- Irwanto, T., y Qadar, T. (2019). Influence of replacement portland cement with white limestone powder from madura as filler on hot asphalt mixture (hot mix) asphalt concrete wearing course (ACWC) on marshall characteristic. *Journal of Physics: Conference Series*, 1375, 012026. DOI: 10.1088/1742-6596/1375/1/012026
- Kim, K., Haeng, S., Kim, N., y Kim, H. (2018). Characteristics of hot mix asphalt containing steel slag aggregate according to temperature and void percentage. *Construction and Building Materials*, 188, 1128-1136. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.172
- Lim, J. W., Chew, L. H., Choong, T. S., Tezara, C., y Yazdi, M. H. (2016). Utilizing steel slag in environmental application - An overview. *Earth and environmental Science*, 36, 012067. DOI: 10.1088/1755-1315/36/1/012067
- López-Díaz, A., Ochoa-Díaz, R., y Grimaldo-León, G. (2018). Use of BOF slag and blast furnace dust in asphalt concrete: an alternative for the construction of pavements. *DYNA*, 85(206), 24-30. DOI: 10.15446/dyna.v85n206.70404
- Martinho, F. C. G., Picado-Santos, L. G., y Capitaio, S. D. (2018). Influence of recycled concrete and steel slag aggregates on warm-mix asphalt properties. *Construction and Building Materials*, 185, 684-696. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.041
- Pérez, H. (2018). *Diseño de mezclas asfálticas en caliente con la adición de escoria metalúrgica - Lima, 2018* (Tesis de grado). Universidad César Vallejo, Lima.

- Rahmawati, A., y Saputro, I. N. (2018). The effects of substitution of the natural sand by steel slag in the properties of eco-friendly concrete with the 1:2:3 ratio mixing method. *Materials Science and Engineering*, 333, 012097. DOI: 10.1088/1757-899X/333/1/012097
- Raposeiras, A., Vargas, A., Movilla, D., y Castro, D. (2016). Effect of copper slag addition on mechanical behavior of asphalt mixes containing reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 119, 268-276. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.081
- Rondón-Quintana, H., Muniz-De-Farias, M., y Reyes-Lizcano, F. (2018). Uso de escorias de alto horno y acero en mezclas asfálticas: revisión. *Ingenierías Universidad de Medellín*, 17(33), 71-97. DOI: 10.22395/rium.v17n33a4
- Rondón-Quintana, H., Ruge-Cárdenas, J., y Muniz, M. (2018). Behavior of Hot-Mix Asphalt Containing Blast Furnace Slag as Aggregate: Evaluation by Mass and Volume Substitution. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2), 04018364. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002574
- Shiha, M., El-Badawy, S., y Gabr, A. (2020). Modeling and performance evaluation of asphalt mixtures and aggregate bases containing steel slag. *Construction and Building Materials*, 248, 118710. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118710
- Tamayo, L. J., y Bautista, L. (2020). *Protocolo para la elaboración de una mezcla asfáltica con incorporación de escoria siderúrgica como llenante mineral* (Tesis de grado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá.
- Veropalumbo, R., Viscione, N., y Formisano, A. (2018). Hot mix asphalt with fly ashes for dense-graded surface layers of rural roads. *Environmental Impact IV*, 215, 93-105. DOI: 10.2495 / EID180091
- Yan, Z., y Hao, Z. (2019). Study on preparation and performance of steel slag asphalt mixture based on steel slag aggregate. *Materials Science and Engineering*, 631, 022067. DOI: 10.1088/1757-899X/631/2/022067

Los contenidos de este documento, representan insumos dentro de un proceso de gestión del conocimiento que, por sí mismos, a priori, no constituyen una declaración de una normativa, procedimiento, criterio o herramienta oficial de acatamiento obligatorio en la gestión de proyectos de obra vial pública de Costa Rica, por parte del LanammeUCR. Cualquier posición oficial para Costa Rica sobre aspectos puntuales contemplados en este documento, se realizarán por los medios que corresponden, según los lineamientos de la Universidad de Costa Rica, de la Ley 8114 y su Reglamento al Art 6 (Decreto 37016 – MOPT).