


Artículo original

Influencia de la escoria metalúrgica en las propiedades mecánicas del pavimento flexible

Influence of Metallurgical Slag on the Mechanical Properties of Flexible Pavement

CÉSAR AUGUSTO MONCAYO YLMA¹

 <https://orcid.org/0000-0001-5686-4834>

Recibido: 9/08/2023

Aceptado: 25/09/2023

Publicado: 17/10/2023

¹Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Universidad Cesar Vallejo, Chiclayo, Perú

E-mail: 1cemoncayoyl@ucvvirtual.edu.pe



Resumen

El desarrollo de la infraestructura de transporte desempeña un papel fundamental en el fomento de actividades turísticas al mejorar la accesibilidad a diversos destinos. La calidad de las carreteras pavimentadas, en particular, influye en el flujo del comercio y el turismo. La investigación se centró en evaluar la influencia de la adición de escoria metalúrgica (EM) en las propiedades mecánicas de los pavimentos flexibles. Se utilizó una muestra de 60 briquetas que se sometieron a pruebas utilizando el método Marshall con diferentes niveles de adición de EM; 5 %, 8 %, 12 % y 15 %. Los resultados revelaron que la combinación de un 4,5 % de contenido de asfalto (CA) y un 12 % EM demostró ser adecuada en términos de estabilidad, alcanzando un valor de 1540,3 kg, así como un flujo promedio de 2,73 cm. En consecuencia, se concluye que la inclusión de EM mejora las propiedades mecánicas de la capa asfáltica, lo que sugiere que este material podría ser utilizado en el diseño de mezclas para pavimentación vial. Se recomienda que el porcentaje de EM a utilizar se encuentre en el rango del 5 % al 10 % para mantener un equilibrio adecuado entre estabilidad y flujo en la mezcla.

Palabras clave: método marshall; escoria metalúrgica; estabilidad, flujo.

Abstract

The development of transportation infrastructure plays a fundamental role in promoting tourism activities by enhancing the accessibility to various destinations. The quality of paved roads particularly influences the flow of trade and tourism. The research focused on evaluating the influence of the addition of metallurgical slag (MS) to the mechanical properties of flexible pavements. A sample of 60 briquettes underwent testing using the Marshall method with different levels of MS addition: 5 %, 8 %, 12 %, and 15 %. The results revealed that a combination of 4.5 % asphalt content (AC) and 12 % MS proved to be suitable in terms of stability, reaching a value of 1540.3 kg, as well as an average flow of 2.73 cm. Consequently, it is concluded that the inclusion of MS enhances the mechanical properties of the asphalt layer, suggesting that this material could be used in the design of mixtures for road paving. It is recommended that the percentage of MS to be used falls within the range of 5 % to 10 % to maintain an adequate balance between stability and flow in the mixture.

Keywords: Marshall method; metallurgical slag; stability; flow.

1. Introducción

El pavimento representa un elemento crucial en el contexto del transporte público, ya que desempeña un papel fundamental en la percepción de los usuarios. Esta importancia se traduce en una significativa inversión económica en este sector, ya que su estado incide directamente en las condiciones de tráfico y la comodidad tanto de peatones como de conductores (Xu et al., 2020). Sin embargo, el mantenimiento y la reconstrucción inadecuados, a menudo restringidos por limitaciones presupuestarias, pueden conducir a un deterioro prematuro del pavimento (Yan et al., 2021). Por otra parte, en el caso de la infraestructura vial, a pesar de su contribución al crecimiento económico y la conectividad entre diversas regiones, se ve obstaculizada por las deficientes condiciones del pavimento flexible, lo que genera problemas en el transporte vehicular, incluyendo vibraciones no deseadas en los vehículos, accidentes de tránsito y un aumento en el consumo de combustible (Milling et al., 2023; Monge & Garrido, 2020).

Este desafío está estrechamente vinculado con la explotación de agregados en la construcción de pavimentos. Tal como resalta Hernández et al. (2021), el enfoque carece de sostenibilidad a largo plazo y agota recursos no renovables, con la consecuente generación de residuos como subproducto. En contraste, Nouman et al. (2022) promueven la producción de mezclas asfálticas y enfatizan el amplio potencial que yace en la incorporación de materiales reciclados, lo cual podría atenuar significativamente el impacto adverso en términos de conservación medioambiental. Además, El crecimiento en la acumulación de desechos, como lo subrayan Piemonti et al. (2021) y Devulapalli et al. (2022) han presentado retos ecológicos y económicos desde mediados del siglo XX.

Según You et al. (2022), la explotación de recursos naturales continúa teniendo un impacto significativo en la industria de la construcción, particularmente en la producción y el mantenimiento de pavimentos asfálticos. Además, Hernandez-Fernandez et al. (2021), Gan et al. (2022), Meshram et al. (2023) y Yao et al. (2022) han señalado el creciente interés en la inclusión de escoria en mezclas asfálticas debido a su influencia positiva en las propiedades mecánicas de estas mezclas.

Para afrontar el desafío, diversos autores incorporaron diferentes materiales reciclados en mezclas asfálticas (Carpio & Mosqueira, 2020), como escoria siderúrgica (Arias & López 2021; Diaz, 2022), escoria de horno (Guerra & Peña, 2021; Carpi & Mosqueira, 2020), escoria de cobre (Mirnezam et al., 2023) y escoria de acero (Chien et al., 2023; Luis & Silva, 2022; Morcote, 2021) quienes evidenciaron mejoras significativas en relación a la estabilidad y el flujo del pavimento. Asimismo, Zhao et al. (2023) resaltaron un rendimiento superior y reducción de costos.

Por ende, la incorporación de escoria metalúrgica (EM) en los pavimentos flexibles plantea la posibilidad de reducir la contaminación, mejorar la resistencia del pavimento y contribuir a una gestión más sostenible de los recursos. Por lo tanto, el objetivo principal de la investigación radica en analizar la influencia de la EM en las propiedades mecánicas del pavimento flexible, centrándose específicamente en la estabilidad y el flujo. Estos hallazgos no solo tienen un impacto positivo en la calidad de las carreteras, sino que también podrían disminuir la generación de residuos industriales, fomentando así un enfoque más sostenible y resistente con el tiempo, lo que resulta en un aumento de la capacidad de carga del pavimento.

2. Metodología

La metodología se basó en el uso de la escoria metalúrgica (EM) añadida al diseño de mezcla del pavimento flexible como un aditivo reciclado. Para ello, se efectuó el análisis granulométrico bajo la normativa NTP 400-012 de los agregados mediante el tamizado de estos, cada uno con diferentes mallas para el fino (N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100, N° 200) y para el grueso (3 in, 2 in, 1½ in, 1 in, ¾ in, ½ in, # 4). El procedimiento consistió en zarandear el agregado de cada muestra tomada para finalmente pesar los materiales retenidos en cada malla (MTC, 2016).

Asimismo, se realizó el ensayo de desgaste del agregado por abrasión de los Ángeles (NTP 400.019), que implicaba tomar la muestra con granulometría definida y colocarla en el cilindro giratorio de acero de forma completamente cerrada y horizontalmente (MTC, 2016). La muestra fue impactada repetidamente por unas esferas metálicas introducidas en el cilindro, y el desgaste obtenido fue del 19,60 %.

Luego, se fabricaron especímenes, también conocidos como briquetas, que se elaboraron para un diseño de mezcla patrón y para los diseños de mezcla con adición de 5 %, 8 %, 12 %, y 15 % de escoria metalúrgica, respectivamente. El método Marshall (ASTM D 1188) utilizó briquetas de pruebas estándar con dimensiones de 6,40 cm (2 1/2") de alto y 10,20 cm (4") de diámetro; la mezcla se preparó en caliente, mediante la combinación de los materiales que componían el diseño de mezcla, y luego se compactó en el molde las briquetas. Los aspectos principales del método Marshall incluyeron la prueba de flujo y estabilidad (AASHTO T 245-97) de los especímenes compactados (ASTM D 1559). La estabilidad estaba relacionada con la carga máxima que soportaba una probeta cuando se ensayaba a una temperatura con una velocidad de 5,8 cm/m; la fluencia Marshall estaba relacionada con el comportamiento de la probeta desde la implementación de la carga hasta el momento en que se producía la falla.

Posteriormente, se registraron los resultados obtenidos respecto a la estabilidad y al flujo; estos resultados fueron analizados de acuerdo con las normas técnicas. Además, se llevó a cabo una comparación de los resultados con valores límites o criterios de aceptación para determinar si las briquetas cumplían con los requisitos de estabilidad y flujo para su uso en pavimentos flexibles.

Finalmente, se presentaron un total de 60 muestras para cada diseño de mezcla con adiciones de escoria metalúrgica, y la mezcla asfáltica patrón (sin adición de escoria metalúrgica) incluyó 12 briquetas. Es importante mencionar que las briquetas tenían dimensiones de 6,35 cm de alto y 10,16 cm de diámetro.

3. Resultados

La mejor estabilidad se logró con un contenido de asfalto (CA) del 5,5 % utilizando las 12 briquetas como muestra patrón de asfalto, lo que resultó en una estabilidad de 1144 kg de las tres pruebas realizadas con un 5,5 % de CA, con un promedio de estabilidad de $1121,7 \pm 20,74$ kg, como se muestra en la Figura 1.

En relación a las muestras asfálticas patrón y el flujo, la Figura 2 ilustra que el mejor se obtuvo con un 4,5 % de contenido de asfalto en peso de la mezcla, lo que resultó en un flujo

promedio de $2,73 \pm 0,06$ cm. Sin embargo, en función de la mejor estabilidad de la mezcla patrón, se registró un flujo de $3,00 \pm 0,10$ cm.

Figura 1
Estabilidad de mezcla asfáltica patrón

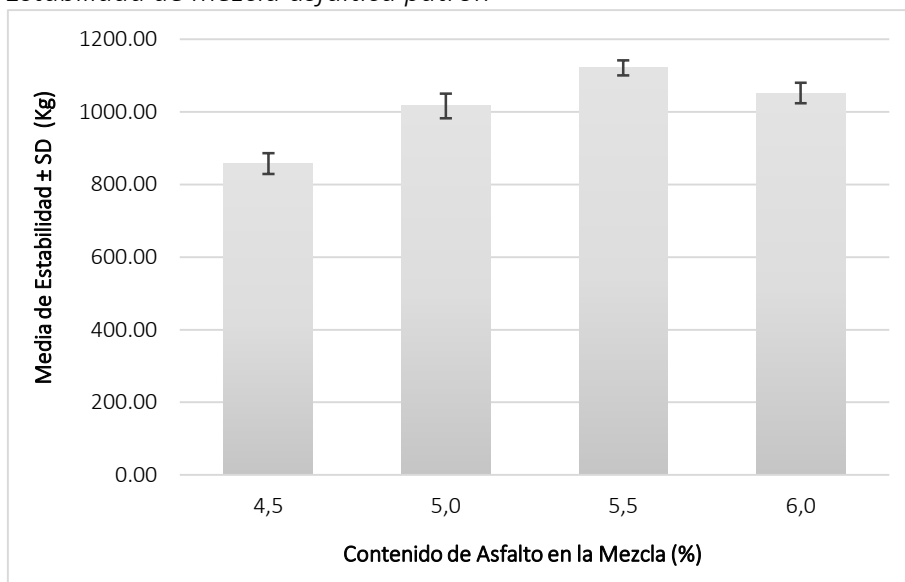
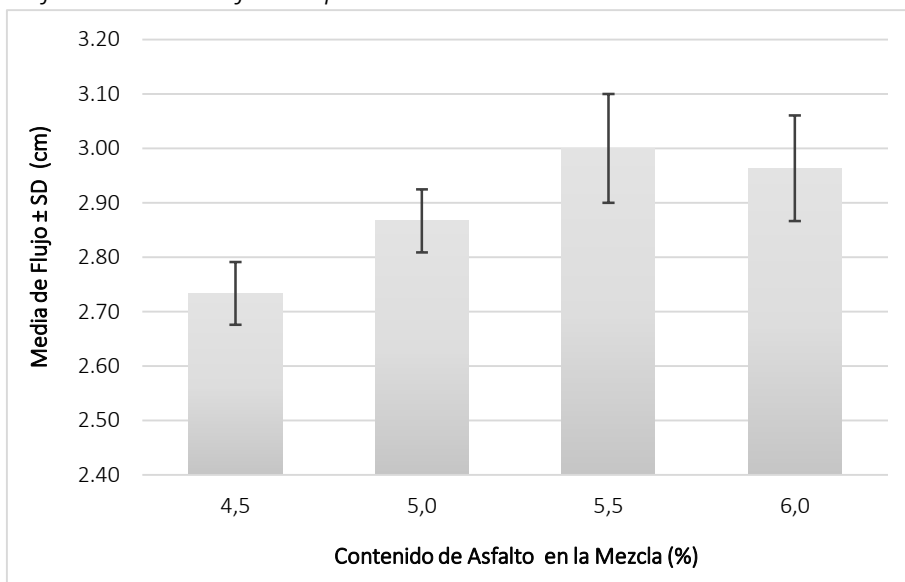


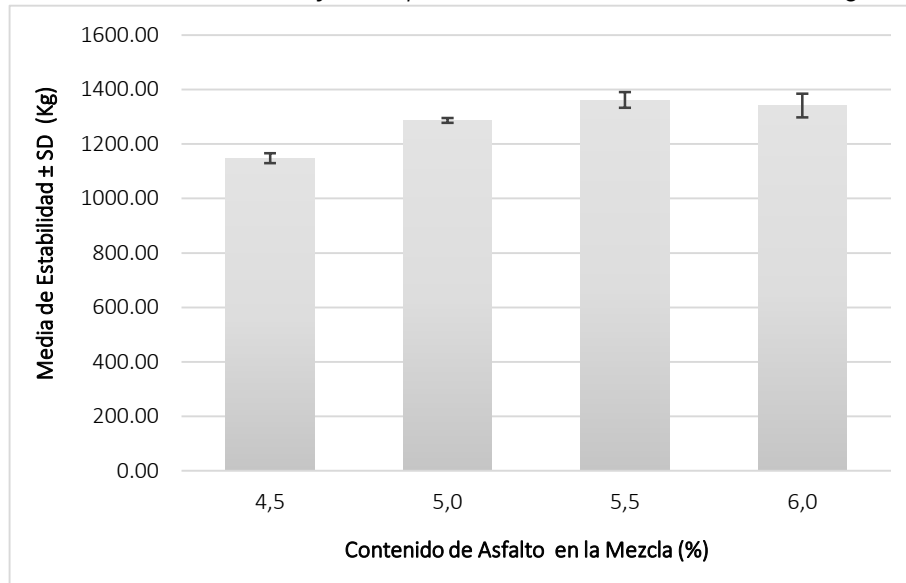
Figura 2
Flujo de mezcla asfáltica patrón



La Figura 3 presenta la representación visual de los resultados obtenidos a partir de las 12 briquetas utilizadas como muestras de asfalto con un 5,0 % de escoria metalúrgica. De estas, el mejor resultado se alcanzó con un 6,0 % de contenido de asfalto en peso de la mezcla, lo que dio como resultado una estabilidad de 1390,50 kg en las tres pruebas realizadas con un 6,0 % de CA. No obstante, el promedio más alto se logró con un 5,50 % de CA, con una estabilidad promedio de $1361,7 \pm 28,73$ kg.

Figura 3

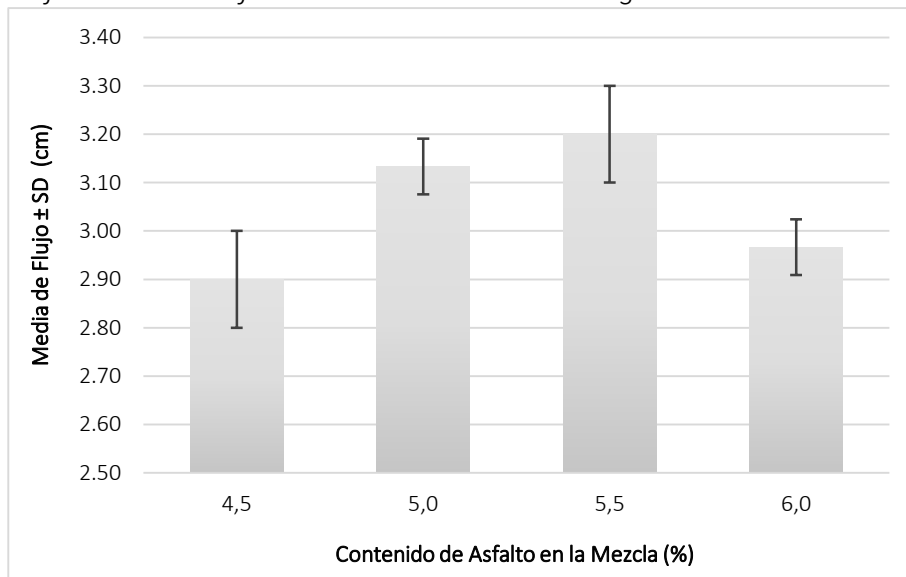
Estabilidad de mezcla asfáltica patrón con 5 % de escoria metalúrgica



En la Figura 4, se proporciona la muestra asfáltica con un 5,0 % de escoria metalúrgica. Se observó que el mejor flujo se obtuvo con un 4,5 % de contenido de asfalto en peso de la mezcla, generando un flujo promedio de $2,90 \pm 0,10$ cm. Sin embargo, en el caso de la mezcla con un 5,0 % de escoria metalúrgica, se obtuvo un flujo de $3,20 \pm 0,10$ cm, en correspondencia con una mayor estabilidad.

Figura 4

Flujo de mezcla asfáltica 5 % de escoria metalúrgica

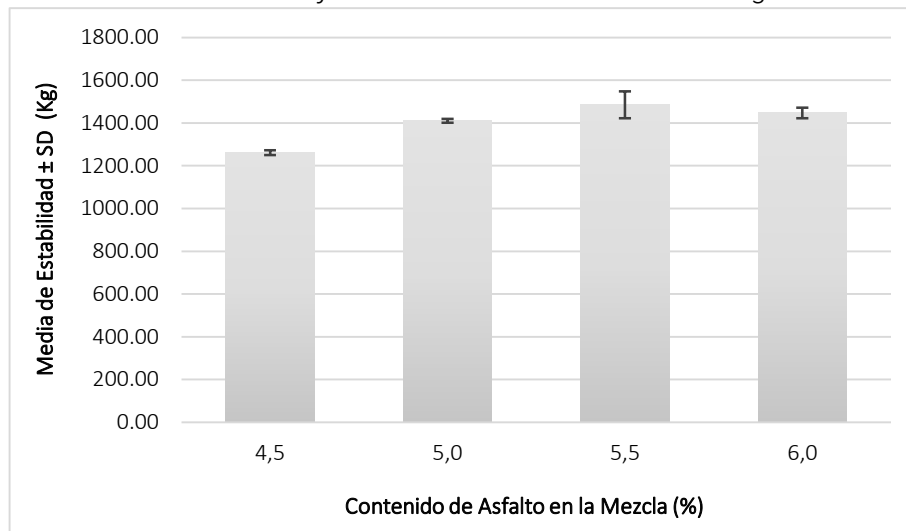


En la Figura 5 se visualiza el resultado de las 12 briquetas utilizadas como muestra de asfalto con un 8 % de escoria metalúrgica. La mayor estabilidad se logró con un 5,5 % de contenido de asfalto en peso de la mezcla, lo que resultó en una estabilidad de 1557 kg en las

tres pruebas realizadas con un 5,5 % de CA, con un promedio de estabilidad de $1485,3 \pm 62,23$ kg.

Figura 5

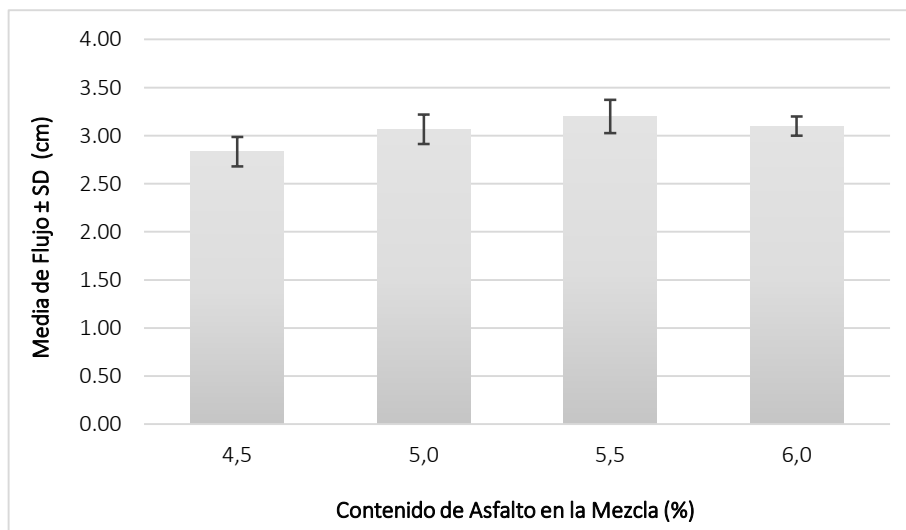
Estabilidad de mezcla asfáltica con 8 % de escoria metalúrgica



En la Figura 6 se presenta la muestra de la mezcla asfáltica con un 8,0 % de escoria metalúrgica. El mejor flujo se obtuvo con un 4,5 % de contenido de asfalto en peso de la mezcla, generando un flujo promedio de $2,83 \pm 0,15$ cm. Sin embargo, en función de la mayor estabilidad de la mezcla con un 8,0 % de escoria metalúrgica, se obtuvo un flujo de $3,20 \pm 0,17$ cm.

Figura 6

Flujo de mezcla asfáltica 8 % de escoria metalúrgica

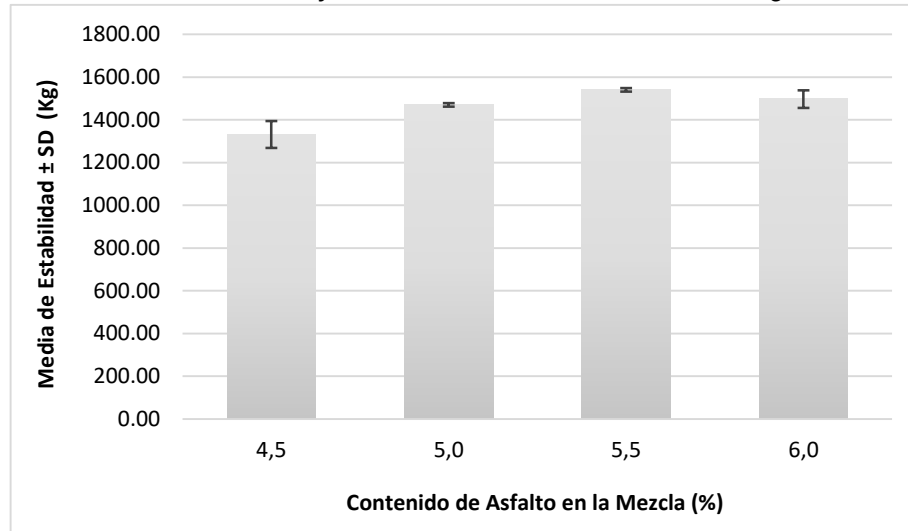


La Figura 7 ilustra los resultados obtenidos a partir de las 12 briquetas utilizadas como muestras de asfalto con un 12 % de escoria metalúrgica. La mejor estabilidad se alcanzó con un 5,50 % de contenido de asfalto en peso de la mezcla, lo que resultó en una estabilidad de 1550

kg en las tres pruebas realizadas con un 5,50 % de CA, con un promedio de estabilidad de $1540,30 \pm 8,50$ kg.

Figura 7

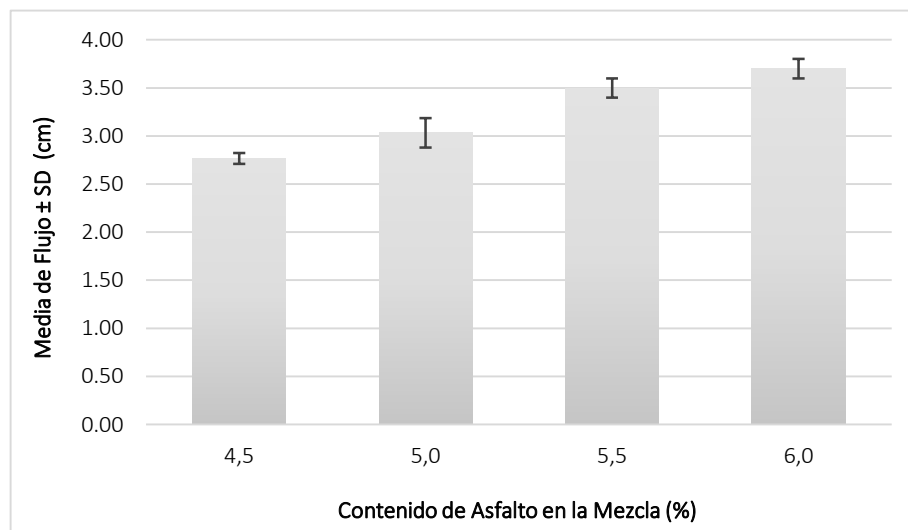
Estabilidad de mezcla asfáltica con 12 % de escoria metalúrgica



Por su parte, en la Figura 8 se visualiza el resultado de las 12 briquetas utilizadas como muestra de asfalto con un 12,0 % de escoria metalúrgica. El mejor flujo se logró con un 4,5 % de contenido de asfalto en peso de la mezcla, obteniendo un flujo promedio de $2,77 \pm 0,06$ cm. Sin embargo, debido a la mayor estabilidad de la mezcla con un 12,0 % de escoria metalúrgica, se registró un flujo de $3,70 \pm 0,10$ cm.

Figura 8

Flujo de mezcla asfáltica 12 % de escoria metalúrgica

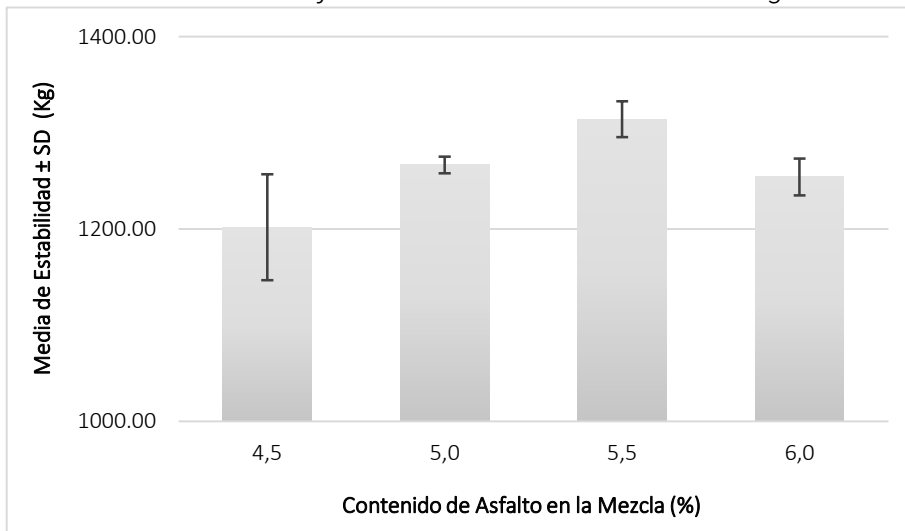


En la Figura 9 se muestra el resultado de las 12 briquetas utilizadas como representación de la muestra asfáltica con un 15,0 % de escoria metalúrgica. La mejor estabilidad se alcanzó con un 6,0 % de contenido de asfalto en peso de la mezcla, lo que dio como resultado una

estabilidad de 1334 kg en las tres pruebas realizadas con un 6,0 % de CA en peso de la mezcla, con un promedio de estabilidad de $1314,33 \pm 18,61$ kg.

Figura 9

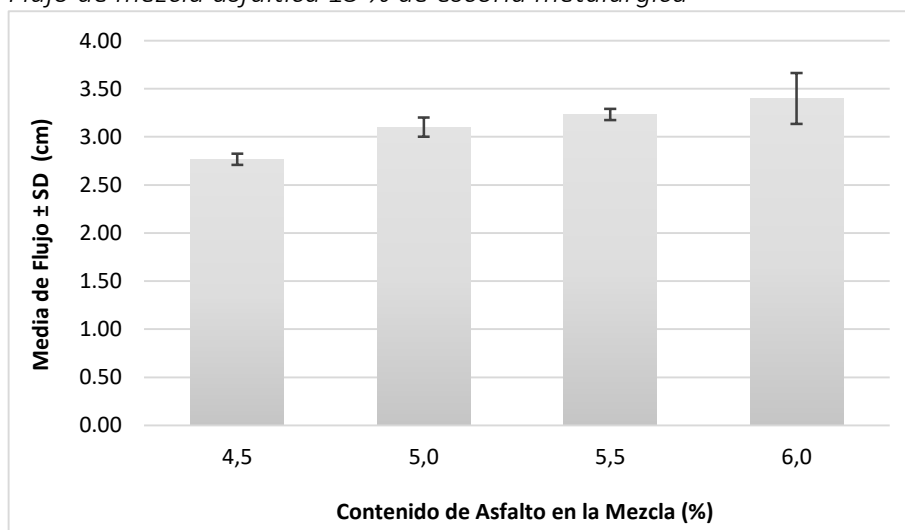
Estabilidad de mezcla asfáltica con 15 % de escoria metalúrgica



En la Figura 10 se presenta el resultado de las 12 briquetas utilizadas como muestra representativa de asfalto con un 15,0 % de escoria metalúrgica. El mejor flujo se logró con un 4,5 % de contenido de asfalto en peso de la mezcla, generando un flujo promedio de $2,77 \pm 0,06$ cm. No obstante, en función de la mayor estabilidad de la mezcla con un 15,0 % de escoria metalúrgica, se obtuvo un flujo de $3,40 \pm 0,26$ cm.

Figura 10

Flujo de mezcla asfáltica 15 % de escoria metalúrgica



Por último, en la Tabla 1 se proporciona un resumen de los resultados obtenidos de las 12 briquetas. Donde la mejor relación promedio de estabilidad/flujo para la mezcla patrón, fue de 3738,9 kg/cm. En contraste, de las 48 briquetas utilizadas para muestras con escoria

metalúrgica, se logró la mejor relación de estabilidad/flujo de 4641,7 kg/cm, lo que representa un aumento del 10,77 % (902,8 kg/cm) en comparación con la mezcla patrón.

Tabla 1

Resumen de resultados estabilidad y flujo

Mezcla	Estabilidad (kg)	Flujo (cm)	Relación Estabilidad/Flujo (kg/cm)
Diseño de Mezcla Patrón	1121,7	0,3	3738,9
Diseño de Mezcla con 5 % de EM.	1361,7	0,32	4255,2
Diseño de Mezcla con 8 % de EM.	1485,3	0,32	4641,7
Diseño de Mezcla con 12 % de EM.	1540,3	0,35	4401,0
Diseño de Mezcla con 15 % de EM.	1314,3	0,32	4064,9

4. Discusión

La estabilidad, según Adrianzen Flores et al. (2022), se vio favorecida con la adición de escoria de acero en porcentajes del 1 % y 0,50 %, mostrando un aumento que osciló entre el 2 % y el 5 % en la mezcla. Esta mejora permite que la mezcla resista desplazamientos y deformaciones bajo la carga del tránsito. Rojas-Manzano et al. (2021), por su parte, sugiere que este material puede reemplazar eficazmente el material granular sin ningún problema. Esto se logra mediante un proceso de tamizado y la definición de pulgadas y la forma de la escoria. Además, la estabilidad con una adición del 2 % permite un incremento del 6 % en las propiedades mecánicas. Tsun et al. (2023) también señala que la escoria contiene componentes metálicos pesados que se recubren con cemento de asfalto cuando se utiliza para reemplazar agregados naturales. Los porcentajes del 4 % y 5 % presentan una buena estabilidad de Marshall, un rendimiento de fluidez óptimo y demuestran una buena durabilidad y resistencia a la humedad. En este estudio, se ha demostrado que la escoria metalúrgica tiene un impacto positivo en la estabilidad del diseño de mezcla de la carpeta asfáltica, con un incremento del 15,73 % con respecto al diseño patrón. Así mismo, los resultados confirman que este material seleccionado no plantea problemas de seguridad estructural, proporciona estabilidad y garantiza una mayor durabilidad frente al desgaste.

En cuanto a la fluidez, según Swathi et al. (2021), la adición del 5 % de escoria de acero permite obtener un flujo de 3,30 cm, lo cual demuestra la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir el asentamiento gradual y su deformación. Osuolale et al. (2023) destacan que la adición del 15 % de polvo de escoria mejora la fluidez de la mezcla, medida mediante el método de Marshall, y aumenta el rendimiento del hormigón asfáltico. De acuerdo con Anupama et al. (2023), una adición del 50 % de escoria mejora la resistencia a la tracción, a la humedad y la fluidez. En este estudio, se ha comprobado que la escoria metalúrgica influye de manera positiva en el diseño de mezcla de la carpeta asfáltica, ya que el flujo aumenta al incorporar distintos porcentajes, alcanzando un flujo promedio adecuado de 2,73 cm. Estos resultados confirman que el material seleccionado mejora la fluidez y reduce la pérdida de abrasión, manteniendo la forma y la angularidad de la mezcla.

5. Conclusiones

Se determinó que el porcentaje adecuado para la propiedad de estabilidad es del 4,5 % de contenido de asfalto (CA) + 12 % de escoria metalúrgica (EM), alcanzando un valor de 1540,3 kg, junto con un flujo promedio de 2,73 cm. Por otro lado, la mayor relación de estabilidad/flujo se logró con la mezcla de 6,0 % de CA + 8,0 % de EM, obteniendo un valor de 4641,7 kg/cm, lo que representa un incremento del 10,77 % (902,8 kg/cm) en comparación con la mezcla patrón.

En lo que respecta a la estabilidad, la escoria metalúrgica influye positivamente en el diseño de la mezcla de la carpeta asfáltica, logrando un incremento del 15,73 % en comparación con la mezcla patrón que consistía en un 5,5 % de CA + 12,0 % de EM.

En cuanto al flujo, la escoria metalúrgica también influye de manera favorable en el diseño de la mezcla de la carpeta asfáltica, ya que se observa un aumento en el flujo al utilizar diferentes porcentajes de EM. El flujo promedio adecuado se sitúa en 2,73 cm. Concretamente, se obtiene un flujo promedio de 2,77 cm con porcentajes de 5,0 %, 8,0 %, 12,0 %, y 15,0 %. Esto supone un incremento del 0,73 % (0,04 cm).

Las mejoras en las propiedades mecánicas de la carpeta asfáltica sugieren que estas mezclas pueden ser utilizadas en diseños de pavimentación vial. Se recomienda que el rango de porcentaje de escoria metalúrgica se sitúe entre 5 % y 10 %, manteniendo en cuenta la relación de Estabilidad/Flujo.

6. Referencias Bibliográficas

- Adrianzen Flores, O. J., Azula Vásquez, J. J., Pacherras Sánchez, C. F., Rodriguez Lafitte, E. D., & Muñoz Perez, S. P. (2022). Uso de distintos tipos de fibras para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica: Una revisión literaria. *Infraestructura vial*, 24(43), 1–16. <https://doi.org/10.15517/iv.v24i43.47931>
- Anupama, J., Balreddy, M. S., & Panditharadhya, B. J. (2023). Sustainable Open-Graded Friction Course asphalt mixes with steel slag aggregates. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.531>
- Arias, A., & López, D. (2021). *Adición de escoria siderúrgica como agregado en mezclas asfálticas en caliente para pavimentos flexibles, Av. Paucartambo - Puente Piedra 2020*. (Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo). <https://hdl.handle.net/20.500.12692/76945>
- ASTM D 1559. (2010). AASHTO T 225 Diseño de Mezclas Método Marshall e Interpretación de resultados. *Ingeniería Geotécnica y control de Calidad*.
- Carpio, S., & Mosqueira, E. (2020). *Incorporación de material reciclado de asfalto en mezcla asfáltica para diseño de pavimento, Jirón Ayacucho km1, Talavera, Andahuaylas, 2020*. (Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo). <https://hdl.handle.net/20.500.12692/82998>
- Chien, H.-T., Chang, J.-R., & Hsu, H.-M. (2023). Determining the content of steel furnace slag in asphalt concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 19(e02399), e02399. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02399>

- Devulapalli, L., Sarang, G., & Kothandaraman, S. (2022). Characteristics of aggregate gradation, drain down and stabilizing agents in stone matrix asphalt mixtures: A state of art review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(2), 167–179. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.10.007>
- Diaz, J. (2022). *Aplicación de escoria siderúrgica en la rehabilitación de la carpeta asfáltica en el distrito de la Tinguña, Ica 2022*. (Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo). <https://hdl.handle.net/20.500.12692/91800>
- Gan, Y., Li, C., Zou, J., Wang, W., & Yu, T. (2022). Evaluation of the impact factors on the leaching risk of steel slag and its asphalt mixture. *Case Studies in Construction Materials*, 16(e01067), e01067. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01067>
- Guerra, M., & Peña, L. (2021). *Evaluación del desempeño mecánico de mezclas asfálticas tipo MDC-9 modificadas con grano de caucho reciclado y escoria negra de horno de acero eléctrico*. (Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás de Aquino). <http://hdl.handle.net/11634/37665>
- Hernandez-Fernandez, N., García-Mejía, T. A., Ramírez-Zamora, R. M., Ochoa-Diaz, R., & Ossa-Lopez, A. (2021). Effect of application of metallurgical slag powders on physical and rheological properties of asphalt. *Construction and Building Materials*, 292(123432), 123432. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123432>
- Luis, J., & Silva, D. (2022). *Escoria de acero y su influencia en las propiedades físico mecánicas de mezclas asfálticas en caliente*. (Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo). <https://hdl.handle.net/20.500.12692/96522>
- Meshram, S., Raut, S. P., Ansari, K., Madurwar, M., Daniyal, M., Khan, M. A., Katare, V., Khan, A. H., Khan, N. A., & Hasan, M. A. (2023). Waste slags as sustainable construction materials: a compressive review on physico mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 5821–5845. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.176>
- Milling, A., Martin, H., & Mwashia, A. (2023). Design, construction, and in-service causes of premature pavement deterioration: A fuzzy Delphi application. *Journal of Transportation Engineering Part B Pavements*, 149(1). <https://doi.org/10.1061/jpeodx.pveng-1071>
- Mirnezami, S., Hassani, A., & Bayat, A. (2023). Evaluation of the effect of metallurgical aggregates (steel and copper slag) on the thermal conductivity and mechanical properties of concrete in jointed plain concrete pavements (JPCP). *Construction and building materials*, 367, 129532. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129532>
- Monge, A., & Garrido, C. (2020). *Impacto de la infraestructura vial sobre la educación rural*. (Tesis de Pregrado, Universidad del Pacífico). <https://repositorio.up.edu.pe/handle/11354/2655?show=full>
- Morcote, C. (2021). *Mezclas asfálticas modificadas con escorias siderúrgicas*. (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia). <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/4824>
- MTC, (2016). Manual de ensayo de Materiales. Ministerio de transportes y comunicaciones. <https://goo.su/0MszQVi>

- Nouman, M., Maqbool, Z., Ali, S., & Saleem, A. (2022). Performance evaluation of wearing course asphalt mixes based on resilient modulus, indirect tensile strength and Marshall stability. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15(1), 63–72. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00011-7>
- Osuolale, O. M., Arinkoola, A. O., & Olawuyi, O. A. (2023). Performance evaluation of bamboo leaf ash and steel slag powder as alternative filler in asphaltic mixes. *Journal of Engineering Research*, 100117, 100117. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100117>
- Piemonti, A., Conforti, A., Cominoli, L., Sorlini, S., Luciano, A., & Plizzari, G. (2021). Use of iron and steel slags in concrete: State of the art and future perspectives. *Sustainability*, 13(2), 556. <https://doi.org/10.3390/su13020556>
- Rojas-Manzano, M. A., Otálvaro-Calle, I. F., Pérez-Caicedo, J. A., Benavides, H. M., & Ambriz-Fregoso, C. (2021). Uso de las escorias de horno de arco eléctrico (EHAE) en la construcción – estado del arte. *Revista UIS ingenierías*, 20(2). <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n2-2021005>
- Swathi, M., Andiyappan, T., Guduru, G., Amarnatha Reddy, M., & Kuna, K. K. (2021). Design of asphalt mixes with steel slag aggregates using the Bailey method of gradation selection. *Construction and Building Materials*, 279(122426), 122426. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122426>
- Xu, O., Han, S., Liu, Y., & Li, C. (2021). Experimental investigation surface abrasion resistance and surface frost resistance of concrete pavement incorporating fly ash and slag. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(14), 1858–1866. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1726348>
- Yan, Z., Liu, W., Chen, J., & Jin, D. (2021). Pavement conductive wearing surface with graphite heating film de-icing potential and performance experimental study. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14(6), 688–696. <https://doi.org/10.1007/s42947-020-0263-1>
- Yao, L., Leng, Z., Lan, J., Chen, R., & Jiang, J. (2022). Environmental and economic assessment of collective recycling waste plastic and reclaimed asphalt pavement into pavement construction: A case study in Hong Kong. *Journal of Cleaner Production*, 336(130405), 130405. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130405>
- You, L., Long, Z., You, Z., Ge, D., Yang, X., Xu, F., Hashemi, M., & Diab, A. (2022). Review of recycling waste plastics in asphalt paving materials. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(5), 742–764. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.07.002>
- Zhao, Z., Wang, Z., Wu, S., Xie, J., Yang, C., Li, N., & Cui, P. (2023). Road performance, VOCs emission and economic benefit evaluation of asphalt mixture by incorporating steel slag and SBS/CR composite modified asphalt. *Case Studies in Construction Materials*, 18(e01929), e01929. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01929>