DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI

ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 14 No. Especial 3 (2026) 428-441

Escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en mezclas asfálticas
Steel Slag as a Partial Substitute for Coarse Aggregate in Flexible Pavement

Karina Molina-Lugo [a], Iván Erick Castañeda-Robles [*a]

[a] *Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.*

Resumen

El aprovechamiento de residuos industriales en infraestructura vial representa una alternativa para reducir el consumo de materiales pétreos convencionales y promover prácticas más sostenibles en la construcción de carreteras. En este estudio se evaluó la incorporación de escoria de acero como sustituto parcial (15%) del agregado grueso en mezclas asfálticas destinadas a pavimentos flexibles. Para ello, se determinaron las propiedades físicas y mecánicas de los materiales mediante ensayos de granulometría, absorción, adherencia y desgaste, de acuerdo con las especificaciones ASTM y NMX aplicables. Posteriormente, se diseñaron mezclas asfálticas con un contenido de asfalto del 5% y se evaluó su desempeño mediante el método Marshall, comparando una mezcla convencional y una modificada con escoria de acero. Los resultados mostraron que la escoria cumplió con los requisitos granulométricos establecidos y presentó una mayor adherencia al ligante asfáltico (98%) respecto al agregado convencional (95%). Asimismo, la mezcla modificada alcanzó una estabilidad Marshall de 1415 kg, superior a la obtenida por la mezcla de referencia (1054 kg), mientras que el flujo se mantuvo dentro de los límites recomendados. Estos resultados evidencian que la incorporación parcial de escoria de acero mejora la resistencia mecánica de la mezcla asfáltica y constituye una alternativa técnicamente viable para su aplicación en pavimentos flexibles.

Palabras Clave: Subproducto siderúrgico, Remplazo, Agregado pétreo, Asfaltos, Ensayo Marshall

Abstract

The utilization of industrial waste materials in road infrastructure offers an alternative for reducing the consumption of conventional aggregates while promoting more sustainable practices in highway construction. This study evaluated the incorporation of steel slag as a partial replacement (15%) of coarse aggregate in asphalt mixtures intended for flexible pavements. To this end, the physical and mechanical properties of the materials were determined through gradation, water absorption, adhesion, and abrasion tests, following the applicable ASTM and NMX standards. Subsequently, asphalt mixtures containing 5% asphalt binder were designed and evaluated using the Marshall method, comparing a conventional mixture with a modified mixture incorporating steel slag. The results showed that the steel slag satisfied the established gradation requirements and exhibited higher adhesion to the asphalt binder (98%) than the conventional aggregate (95%). In addition, the modified mixture achieved a Marshall stability of 1415 kg, exceeding that of the reference mixture (1054 kg), while the flow values remained within the recommended limits. These findings indicate that the partial incorporation of steel slag enhances the mechanical performance of asphalt mixtures and represents a technically viable alternative for application in flexible pavement construction.

Keywords: Steel Slag, Replacing, Mineral aggregate, Asphalt mixes, Marshall test

1. Introducción

1.1. Pavimentos flexibles

Según la N·PRY·CAR·5·01·001, el pavimento asfaltico se define como una estructura flexible, y como puede observarse en la figura 1 a continuación, está formada por una capa de subbase, una capa de base hidráulica, carpeta asfáltica y capa de rodadura, que es capaz de soportar y distribuir los esfuerzos inducidos por el tránsito de vehículos, además de resistir los agentes ambientales prevalecientes en el sitio, durante su vida útil prevista (SICT, 2024).

Es importante resaltar que la capa de rodadura y la carpeta asfáltica no son lo mismo, según la norma

*Autor para la correspondencia: ivan_castaneda@uaeh.edu.mx
Correo electrónico: karinamolinaligo@gmail.com (Karina Molina Lugo), ivan_castaneda@uaeh.edu.mx (Iván Erick Castañeda Robles)

Historial del manuscrito: recibido el 12/06/2026, última versión-revisada recibida el 30/09/2026, aceptado el 02/10/2026, publicado el 06/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial3.18155

N·PRY·CAR·5·01·005 las capas de rodadura son aquéllas que no tienen función estructural y poseen un espesor menor a 4cm.

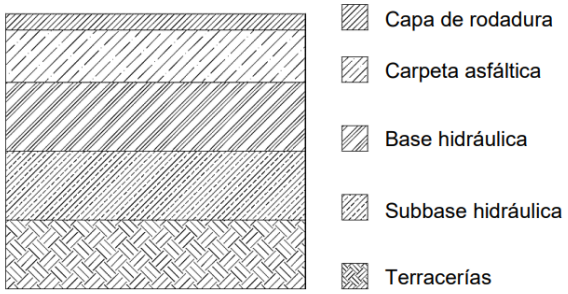


Figura 1. Sección transversal de un pavimento asfáltico convencional
Obtenido de la N·PRY·CAR·5·01·001 (SICT 2024)

Mientras que las carpetas asfálticas se definen como aquellas que se construyen mediante el tendido y compactación de una mezcla de materiales pétreos de granulometría densa o continua y cemento asfáltico, modificado o no, en su caso, aditivos y adiciones, utilizando calor como vehículo de incorporación.

Estas carpetas, debido a que generalmente tienen espesores mayores de 4cm, tienen la función estructural de soportar y transmitir la carga de los vehículos hacia las capas inferiores del pavimento. (SCT, 2020).

Los pavimentos flexibles, también conocidos como carpetas asfálticas, se caracterizan por distribuir las cargas vehiculares a través de capas con menor rigidez estructural en comparación con los pavimentos rígidos. Debido a esta menor rigidez, presentan una mayor capacidad de deformación ante las cargas del tránsito, lo que genera esfuerzos y deformaciones más significativas en la subrasante (Huang y otros, 2021). En contraste, los pavimentos rígidos, al contar con una losa de concreto de alta rigidez, distribuyen las cargas sobre áreas más amplias y reducen las tensiones transmitidas al suelo de soporte (AASHTO, 2022).

En la actualidad, las carreteras representan una infraestructura esencial para el desarrollo urbano y económico en México. Sin embargo, su construcción y mantenimiento representan un reto constante debido a las deficientes condiciones del pavimento flexible, lo que genera un impacto negativo en el transporte y en los costos operativos. Según el Instituto Mexicano del Transporte (IMT, 2024), la Red Nacional de Caminos cuenta con más de 916,000 km, de los cuales 179,536 km están pavimentados. El deterioro de las carreteras incrementa significativamente los costos de operación vehicular, debido al aumento en el consumo de combustible, desgaste mecánico y tiempos de recorrido (Villegas, Mendoza y Abarca, 2021).

Estudios internacionales han demostrado que, en pavimentos con elevados niveles de rugosidad superficial (IRI ≈ 5 m/km), los costos de reparación y mantenimiento de los vehículos pueden incrementarse hasta en un 40 % para automóviles y un 50 % para vehículos pesados, mientras que el consumo de combustible aumenta entre 2 y 3 % por cada incremento de 1 m/km en el IRI, evidenciando el impacto económico que tiene el deterioro del pavimento sobre los usuarios (Zaabar y Chatti, 2014).

En este contexto, la implementación de alternativas sostenibles para la construcción y rehabilitación de pavimentos flexibles responde a la necesidad de reducir el impacto ambiental y optimizar el uso de los recursos naturales. La explotación continua de bancos de materiales incrementa el consumo de agregados pétreos y las emisiones asociadas a su extracción y transporte. Por ello, el aprovechamiento de subproductos industriales, como la escoria de acero, constituye una alternativa que favorece la economía circular, disminuye la extracción de materiales naturales y mantiene el desempeño mecánico de las mezclas asfálticas cuando se incorpora bajo criterios técnicos adecuados.

Lo anterior motiva la búsqueda de alternativas sostenibles para la fabricación de pavimentos. Una de ellas es la incorporación de escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en mezclas asfálticas. La escoria, coproducto de la industria siderúrgica, posee características físicas que podrían mejorar las propiedades del pavimento, al tiempo que se reduce el impacto ambiental de la extracción de agregados naturales (Moura y otros, 2022).

Adentrándonos en el tema, podemos empezar aclarando que, la escoria siderúrgica se genera durante el proceso de fabricación del acero, cuando los compuestos no metálicos presentes en el horno, principalmente óxidos de hierro, cal y sílice reaccionan con las impurezas del metal líquido. Este subproducto presenta características físicas como color gris oscuro, textura áspera y partículas de morfología angular o prismática, además de cierta porosidad superficial, propiedades que favorecen su empleo como agregado grueso en mezclas asfálticas para pavimentos flexibles (Pérez-Rojas y Vera-López, 2021).

Así, la utilización de escoria de acero en pavimentos flexibles ha sido estudiada como una alternativa sostenible para disminuir el consumo de agregados naturales y reducir el impacto ambiental asociado a la extracción de materiales pétreos, actividad que provoca alteraciones en cauces, erosión del suelo y degradación de ecosistemas asociados a bancos de arena y grava (Porras y otros, 2021; Li y otros, 2022).

En México se extraen más de 40 millones de toneladas de arena y grava al año, esta actividad genera alrededor de 1.5 millones de toneladas de CO_2 anualmente (CANACERO, 2022). Por otro lado, la industria acerera nacional produce aproximadamente 2.25 millones de toneladas de escoria de acero al año, de las cuales solo el 20% se reutiliza; esto contrasta con países como Japón o Alemania, donde se reutiliza hasta el 100% de esta escoria (Rogel y Zamora, 2023).

Las mezclas asfálticas densas son ampliamente utilizadas debido a su adecuado desempeño estructural y funcional en pavimentos de alto tránsito (Georgiou y Loizos, 2021). Diversas investigaciones recientes han señalado que la escoria de acero, gracias a su textura angular y superficie porosa, mejora la adhesión entre el agregado y el ligante asfáltico, favoreciendo el comportamiento mecánico de la mezcla (Arabani y otros, 2021; Wang y otros, 2024). Asimismo, la composición mineralógica de la escoria, rica en óxidos de calcio, hierro y silicio, le confiere alta resistencia mecánica y elevada resistencia al desgaste por abrasión (Pasetto et al., 2022). Estudios recientes también reportan que la incorporación de escoria de acero incrementa la estabilidad de las mezclas asfálticas y reduce la susceptibilidad al daño por humedad o fenómeno de stripping (Behnood y otros, 2023; Benavides y otros, 2024).

A pesar de su potencial, su aplicación en México aún es limitada. Esta investigación busca aportar evidencia experimental sobre su desempeño en pavimentos flexibles,

contribuyendo a los ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), mediante el desarrollo de alternativas sostenibles para la infraestructura vial, y ODS 12 (Producción y consumo responsables), al promover el aprovechamiento de residuos industriales y el uso eficiente de los recursos naturales.

El objetivo general de esta investigación fue diseñar un pavimento flexible con agregado parcial de escoria de acero en sustitución al agregado tradicional para mejorar sus propiedades físicas, así como la obtención de una mezcla sostenible. Todo esto con la hipótesis de que, la sustitución parcial del agregado grueso por escoria de acero en pavimentos flexibles mejora su calidad estructural al incrementar la durabilidad, reducir el desgaste y la deformación sin afectar su comportamiento a largo plazo. Además, esta estrategia favorece la sostenibilidad al reutilizar un subproducto industrial.

1.2. Escoria de alto horno

Las escorias industriales se clasifican generalmente en escorias ferrosas, no ferrosas y de incineración. Las escorias ferrosas provienen principalmente de la producción de hierro y acero, incluyendo las escorias de alto horno y de acería; las no ferrosas se originan en procesos metalúrgicos de metales como cobre, aluminio y zinc; mientras que las escorias de incineración permiten la recuperación de metales reutilizables y otros materiales de valor industrial (Zhang y otros, 2021; Wang y otros, 2022). Debido a su contenido de compuestos metálicos y minerales, como lo son el óxido de calcio (CaO), dióxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de magnesio (MgO) y, en menor proporción, óxidos de hierro (FeO y Fe_2O_3), estos subproductos son considerados recursos secundarios con potencial de reutilización en distintas aplicaciones industriales, reduciendo así la disposición final en vertederos y los impactos ambientales asociados (Wang y otros, 2022).

Durante el proceso siderúrgico, la interacción entre fundentes y compuestos minerales presentes en el hierro genera escorias con propiedades hidráulicas y cementicias, caracterizadas por una estructura parcialmente vítrea y elevada estabilidad mecánica (Guo y otros, 2021). Las escorias de alto horno granuladas (Ground Granulated Blast Furnace Slag, GGBFS) están compuestas principalmente por óxidos de calcio (CaO), silicio (SiO_2) y aluminio (Al_2O_3), componentes que favorecen su resistencia mecánica y su desempeño como material alternativo en mezclas asfálticas y cementicias (Zhang y otros, 2022). Además, investigaciones recientes reportan que estas escorias mejoran la adherencia entre agregados y ligantes asfálticos, así como la durabilidad de los pavimentos (Liu y otros, 2023).

Actualmente, las escorias de alto horno son ampliamente reutilizadas en la industria de la construcción, especialmente en la fabricación de cemento, estabilización de suelos e infraestructura vial en materia de bases hidráulicas y carpetas asfálticas, contribuyendo a la economía circular y a la reducción del consumo de agregados naturales (Guo y otros, 2021; Liu y otros, 2023).

1.3. Escoria de acero

Las escorias de acero, conocidas internacionalmente como Steel Slag (SS), son subproductos generados durante los procesos siderúrgicos realizados en hornos básicos de oxígeno (Basic Oxygen Furnace, BOF) y hornos de arco eléctrico (Electric Arc Furnace, EAF), donde el hierro fundido o la chatarra metálica son refinados mediante oxígeno y altas temperaturas (Guo y otros, 2021; Wang y otros, 2022). La producción de estas escorias representa aproximadamente entre el 10 % y el 20 % del peso total del acero fabricado, generándose alrededor de 100 a 200 kg de escoria por tonelada de acero producido (Zhang y otros, 2021).

A nivel internacional, la reutilización de escorias siderúrgicas ha incrementado significativamente debido a su potencial como material alternativo en aplicaciones de ingeniería civil y construcción. En Europa y Estados Unidos, una parte importante de las escorias producidas se destina a infraestructura vial, especialmente como agregado para mezclas asfálticas y bases de pavimento, debido a sus propiedades mecánicas y de durabilidad (Pasetto y otros, 2022; Liu y otros, 2023). No obstante, la variabilidad en la composición química y mineralógica de las escorias, derivada de los procesos de producción del acero, así como las diferencias en los materiales pétreos, ligantes asfálticos, entre otros factores, hacen que los resultados obtenidos en otros países no sean directamente extrapolables al contexto mexicano. En este sentido, existe la necesidad de generar evidencia experimental que permita evaluar el desempeño de las escorias a nivel nacional y determinar su viabilidad técnica como sustituto parcial de los agregados convencionales en mezclas asfálticas densas.

Las escorias de acero (SS) son ampliamente utilizadas en aplicaciones de ingeniería civil y ambiental, incluyendo la fabricación de concreto y cemento, construcción de carreteras, estabilización de suelos, tratamiento de aguas residuales y recuperación de materiales metálicos, debido a sus propiedades físicas y químicas favorables (Guo y otros, 2021; Wang y otros, 2022).

Su composición mineralógica está constituida principalmente por óxidos de calcio (CaO), hierro (Fe), silicio (SiO_2), magnesio (MgO) y manganeso (MnO), componentes que les proporcionan alta dureza, resistencia al desgaste por abrasión y una adecuada adherencia con los ligantes asfálticos (Pasetto y otros, 2022; Behnood y otros, 2023). Además, su pH elevado y estructura porosa, como se observa en la figura 2, contribuyen a una excelente adhesión con el ligante, mejorando el desempeño frente al stripping (Kavussi y Qazizadeh, 2014).

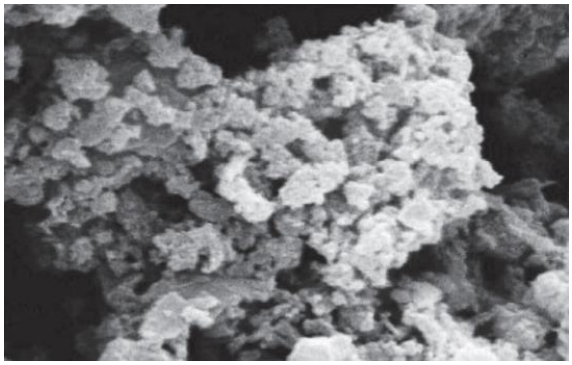


Figura 2. Características morfológicas de las SS. Obtenido de (Kavussi, y Qazizadeh, 2014).

En conclusión, Mientras que las BFS destacan por sus propiedades cementicias y su uso en la producción de cemento y asfaltos, las SS presentan una mayor resistencia mecánica y se emplean principalmente en infraestructura vial y estabilización de suelos. Ambas escorias representan alternativas sostenibles para la reutilización de residuos industriales, contribuyendo a la economía circular y la reducción del impacto ambiental.

2. Metodología

La metodología de esta investigación tiene como objetivo definir y desarrollar el enfoque experimental y los procedimientos empleados para evaluar la viabilidad de la incorporación de escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en pavimentos flexibles. A través de un diseño experimental riguroso, se analizarán las propiedades mecánicas y el desempeño del pavimento modificado en comparación con un pavimento tradicional.

Debido a restricciones asociadas al suministro y manejo del material evaluado, no fue posible realizar campañas adicionales de ensayo durante el periodo de investigación. No obstante, todas las pruebas consideradas en el estudio fueron ejecutadas conforme a los procedimientos normativos correspondientes y mediante equipos debidamente calibrados.

A continuación, en la figura 3, se presenta un diagrama de flujo general que expone el procedimiento llevado a cabo en esta investigación:

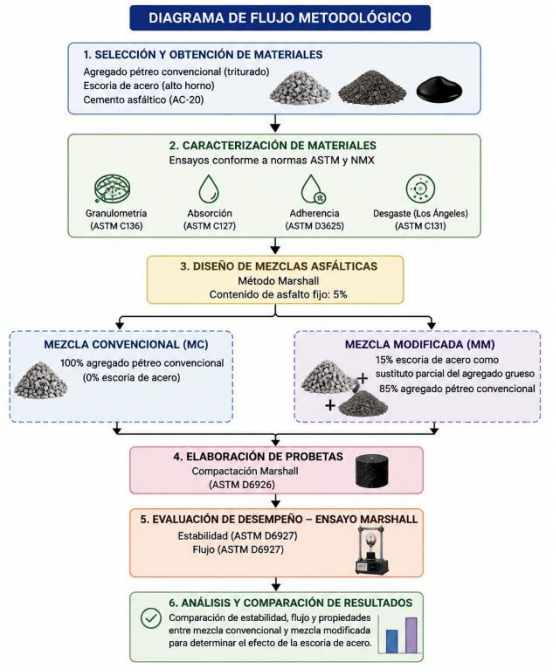


Figura 3. Diagrama de flujo metodológico

2.1. Preparación de los materiales

Para comenzar la experimentación, primero se realizaron pruebas en los agregados gruesos, tanto en el tradicional como en la escoria, todo esto con el objetivo de determinar las características físicas del agregado. Estas pruebas fueron fundamentales para evaluar la idoneidad del material en cuanto a su comportamiento dentro de una mezcla asfáltica, entre los ensayos efectuados se incluye su granulometría, la abrasión en la máquina de Los Ángeles, que permite medir la resistencia al desgaste del agregado; la absorción, que determina la capacidad del material para retener líquidos; la adherencia, que evalúa la capacidad del agregado para unirse con el asfalto; y la gravedad específica, la cual permite conocer la relación entre el peso del agregado y su volumen. Cada una de estas pruebas proporciona información clave para el diseño y desempeño de las mezclas.

2.1.1. Granulometría

Se realizó un análisis granulométrico conforme a la norma NMX-C-077-ONNCCE-2014 para determinar la distribución del tamaño de partículas del agregado. La muestra fue secada hasta masa constante, pesada y tamizada mecánicamente usando cribas de diferentes tamaños, colocadas de mayor a menor tamaño, desde la malla superior (con una abertura de 2”), hasta la inferior (con una abertura de 0.0029”), incluyendo la charola colectora. Se registró el material retenido en cada malla y se calculó el porcentaje que pasaba, generando la curva granulométrica para verificar su conformidad con los rangos exigidos para pavimentos flexibles.

2.1.2. Absorción

Bajo la norma ASTM C127, se determinó el porcentaje de absorción del agregado grueso. La muestra, de 3000 g, fue sumergida en agua por 24 horas y secada superficialmente para alcanzar el estado saturado superficialmente seco (SSS). Se pesó en ese estado (A) y tras secado en horno (B), calculándose la absorción con la fórmula:

$$\text{Absorción (\%)} = ((A - B) / B) \times 100 \qquad (1)$$

2.1.3. Abrasión en máquina de Los Ángeles

Una vez lavado y seco, el material se separa y clasifica obteniendo su granulometría de acuerdo con el arreglo de mallas indicado en la tabla 1, eliminando el material que pase la malla No.10 (2,0 mm).

Tabla 1. Disposición de malla

Designación	Abertura (mm)
2"	50
1½"	37.5
1"	25
¾"	19
½"	12.5
⅜"	9.5
¼"	6.3
N°4	4.75
N°10	2.0
N°12	1.7

De acuerdo con la norma NMX-C-196-ONNCCE-2010, el material se debe separar y clasificar a modo de elegir el tipo de composición que se debe utilizar para integrar la muestra de ensayo que mejor se asemeje a las características granulométricas obtenidas. Para nuestro caso de estudio, los

resultados de nuestra muestra de escoria, se presenta en la tabla 8 referida en el apéndice A, identificando que tendríamos una muestra tipo A.

Se obtuvo la masa inicial de la muestra (Mi), la cual se introdujo en la máquina de Los Ángeles junto con 12 esferas de acero, conforme a la norma anteriormente mencionada. Se aplicaron 500 revoluciones, tras lo cual el material se tamizó, descartando la fracción que pasó la malla No. 12 (1.7 mm). La muestra restante fue lavada, secada en horno a 110 °C ± 5 °C hasta masa constante, enfriada a temperatura ambiente y pesada nuevamente (Mf) para calcular el desgaste por abrasión.

$$D = \frac{Mi - Mf}{Mi} * 100 \quad (2)$$

2.1.4. Adherencia

Para evaluar la adherencia entre el asfalto y los agregados pétreos, se implementó el método de desprendimiento por fricción descrito en la norma M-MMP-4-04-009/03.

Se prepararon seis porciones de 500 g de agregado, clasificadas por granulometría y calentadas a 135 ± 5 °C, que se mezclaron con cemento asfáltico en tres proporciones (5.5%, +0.5% y -0.5%) para simular variaciones de campo. De cada porción se extrajeron dos muestras de 50 g, que se enfriaron y colocaron en frascos con agua destilada a 25 °C durante 24 horas. Luego se evaluó visualmente la adherencia y, si no hubo desprendimiento, se aplicaron cuatro ciclos de agitación mecánica de 15 minutos, observando el área desprendida respecto a un material testigo.

2.2. Diseño de mezcla

La selección del contenido de ligante y del porcentaje de sustitución de escoria de acero como agregado grueso se estableció con base en estudios previos que han reportado rangos de dosificación asociados con un adecuado comportamiento mecánico y durabilidad de las mezclas asfálticas. Para esta investigación, se adoptó un contenido fijo de ligante de 5 % como condición de diseño y comparación de las mezclas, considerando, por una parte, resultados de ensayos previos realizados por el laboratorio del que se obtuvieron los especímenes y, por otra, los antecedentes reportados en la literatura. Si bien los resultados de dichos ensayos de laboratorio no fueron proporcionados para su inclusión en este estudio, el personal responsable indicó que un contenido de 5 % había sido empleado previamente en mezclas con escoria de acero como agregado grueso. Esta selección también es consistente con estudios que, mediante el método Marshall, han empleado contenidos de ligante comprendidos entre 4.9 % y 5.2 % en mezclas asfálticas con incorporación de escoria de acero (Ahmedzade y Sengoz, 2009; Ziari y otros, 2015; Luan y otros, 2021; Prakash y otros, 2021; Xue y otros, 2022). Por lo tanto, el 5 % se consideró en este trabajo como un contenido fijo de ligante para la evaluación comparativa de las mezclas, y no como un contenido óptimo determinado experimentalmente mediante el procedimiento de diseño de mezclas.

Por ello, este estudio adoptó un contenido de asfalto del 5% y un 15% de escoria como reemplazo parcial de agregado grueso, apoyándose también en diversas investigaciones que han evaluado el comportamiento de mezclas con estas características. Por ejemplo, Moncayo (2023) encontró que con un 4.5% de asfalto y un 12% de escoria se obtenía una alta resistencia y estabilidad, resaltando que aumentos en el contenido de ligante podían reducir la rigidez. Huillca (2023) concluyó que una dosificación de 5% de asfalto y 10% de escoria ofrecía un equilibrio adecuado entre trabajabilidad y resistencia. Por su parte, Calva (2021) reportó que una combinación de 5.5% de asfalto con 15% de escoria mejoraba significativamente la resistencia a la deformación permanente sin comprometer la durabilidad.

Con base en estos antecedentes, se eligió un valor intermedio de asfalto (5%), dentro del rango recomendado, asegurando así una mezcla con buena cohesión y flexibilidad. Asimismo, el 15% de escoria fue seleccionado al comprobarse que este nivel mejora las propiedades de la mezcla asfáltica, especialmente la resistencia a la fatiga y la capacidad de soporte, sin afectar la adherencia del ligante.

Finalmente, esta dosificación representa un balance entre los beneficios observados en la literatura, evitando tanto un exceso de asfalto que genere deformaciones plásticas, como una deficiencia que comprometa la adherencia y trabajabilidad.

2.3. Elaboración de briquetas

La fabricación de los especímenes se realizó de acuerdo con la norma ASTM D6927. Con el propósito de evaluar la repetibilidad de los resultados, se elaboraron tres briquetas para la mezcla convencional y tres para la mezcla modificada con escoria de acero, obteniéndose un total de seis especímenes.

Previamente a la preparación de las mezclas, los agregados pétreos se secaron en horno a 110 ± 5 °C durante 24 h para eliminar la humedad residual. Posteriormente, los agregados fueron calentados entre 160 y 170 °C, mientras que el cemento asfáltico se acondicionó por separado a una temperatura comprendida entre 135 y 150 °C.

Una vez alcanzadas las temperaturas de trabajo, el ligante asfáltico se incorporó gradualmente a los agregados calientes y la mezcla se homogeneizó hasta obtener un recubrimiento uniforme de las partículas. Posteriormente, el material se colocó en moldes Marshall previamente calentados entre 100 y 150 °C. El llenado se realizó en tres capas sucesivas para favorecer una distribución homogénea de la mezcla.

La compactación se efectuó mediante un martillo Marshall de 4.535 kg, aplicando 50 golpes por cada cara de la briqueta, conforme a los requisitos de la ASTM D6927. Para asegurar una densidad uniforme, las probetas fueron compactadas en ambas caras mediante la inversión del molde después de la primera etapa de compactación.

Tras finalizar el proceso, los especímenes permanecieron aproximadamente 10 min dentro de los moldes para favorecer su enfriamiento inicial. Posteriormente, fueron desmoldados mediante un extractor Marshall y acondicionados a temperatura ambiente (23 ± 2 °C) durante un periodo mínimo de 12 h antes de la realización de los ensayos mecánicos.

Todo el procedimiento experimental se desarrolló bajo las condiciones establecidas por la ASTM D6927, garantizando la uniformidad de los especímenes y la confiabilidad de los resultados obtenidos.

2.4. Pruebas de laboratorio en briquetas

El desempeño mecánico de las mezclas asfálticas fue evaluado mediante los ensayos de estabilidad y flujo Marshall, de acuerdo con la norma ASTM D6927-22, *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*, empleando especímenes preparados conforme a la norma ASTM D6926-20, *Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus*. Estos ensayos permitieron determinar la capacidad de la mezcla para resistir cargas y su comportamiento ante deformaciones bajo condiciones controladas de laboratorio. Los parámetros obtenidos constituyen indicadores ampliamente utilizados para valorar la calidad estructural de las mezclas asfálticas y su potencial desempeño en aplicaciones de pavimentos flexibles.

2.4.1. Estabilidad y Flujo

La determinación de la estabilidad y el flujo Marshall se realizó de acuerdo con la norma ASTM D6927. Previo al ensayo, las briquetas fueron acondicionadas en un baño de agua a 60 ± 1 °C durante un periodo de 30 a 40 min para garantizar una temperatura uniforme en todo el espécimen.

Posteriormente, cada probeta se colocó en el dispositivo de carga Marshall y se sometió a una carga de compresión aplicada a una velocidad constante de 50.8 mm/min (2 in/min) hasta alcanzar la carga máxima. El valor máximo registrado durante el ensayo se reportó como la estabilidad Marshall, expresada en kilogramos.

De manera simultánea, se registró la deformación total experimentada por la muestra al momento de alcanzar la carga máxima. Esta deformación, expresada en milímetros, se reportó como flujo Marshall y constituye un indicador de la capacidad de deformación de la mezcla bajo condiciones de carga.

Los valores de estabilidad y flujo obtenidos fueron utilizados para comparar el comportamiento mecánico de la mezcla convencional y la mezcla modificada con escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso.

2.4.2 Análisis estadístico

Los resultados de estabilidad y flujo obtenidos mediante el ensayo Marshall fueron analizados estadísticamente para evaluar las diferencias entre la mezcla tradicional y la mezcla modificada. Para cada condición se consideraron tres especímenes independientes ($n = 3$), y los resultados se expresaron como media ± desviación estándar (DE).

Las diferencias entre ambas mezclas se evaluaron mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA), considerando el tipo de mezcla como factor y un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Se consideraron estadísticamente significativas las diferencias con valores de $p < 0.05$. Debido a que el análisis incluyó únicamente dos grupos experimentales, no se realizaron pruebas de comparación múltiple *post hoc*.

3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio realizados, así como su análisis y comparación con investigaciones previas reportadas en la literatura especializada.

3.1. Granulometría

La Figura 4 presenta la curva granulométrica obtenida para el agregado evaluado, expresada como porcentaje acumulado que pasa a través de cada malla en función de su abertura nominal. La línea roja corresponde a los resultados experimentales obtenidos durante el análisis granulométrico, mientras que las líneas negras representan los límites inferior y superior establecidos por la norma NMX-C-077-ONNCCE-2014.

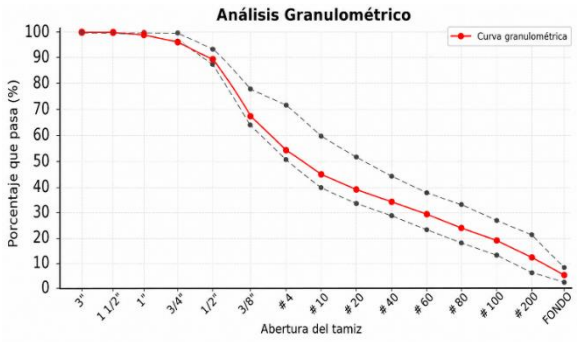


Figura 4. Curva granulométrica obtenido del tamizado del material

Como se observa, la distribución granulométrica del material se mantiene dentro de la banda especificada por la normativa, lo que indica que el agregado cumple con los requisitos de gradación establecidos para su utilización en mezclas asfálticas.

3.2. Propiedades físicas de los agregados

La Tabla 2 presenta los resultados de los ensayos de absorción, adherencia y desgaste por abrasión efectuados al agregado pétreo convencional y a la escoria de acero. La comparación de estos parámetros permite identificar las diferencias en el comportamiento de ambos materiales y analizar su influencia potencial en el desempeño de las mezclas asfálticas evaluadas.

Tabla 2. Propiedades de los agregados

Propiedad	Agregado Tradicional	Escoria de Acero	Requisito ASTM
Absorción (%)	0.98	2.10	-
Adherencia (%)	95	98	≥ 95%
Abrasión (%)	22.2	26.6	≤ 40%

3.3. Comportamiento de las mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas fueron evaluadas mediante pruebas de flujo y estabilidad utilizando briquetas. Se compararon mezclas tradicionales con aquellas modificadas con escoria de acero, los resultados obtenidos son ilustrados a continuación en la tabla 3.

Tabla 3. Propiedades de las mezclas

	Tradicional	**Modificada**	**Requisitos ASTM y AASHTO**
Flujo	3.5 mm	3.2 mm	2 – 4 mm
Estabilidad	1054 kg	1415 kg	> 510 kg

4. Discusión

4.1. Hipótesis explicativas a partir de resultados obtenidos directamente

Granulometría

La curva granulométrica de la escoria de acero se mantuvo dentro de los límites establecidos por la NMX-C-077-ONNCCE-2014, lo que confirma su compatibilidad con los requisitos de gradación exigidos para agregados empleados en mezclas asfálticas. Este cumplimiento es relevante, ya que una adecuada distribución de tamaños favorece el empaquetamiento de las partículas y contribuye a la estabilidad estructural de la mezcla. En consecuencia, desde el punto de vista granulométrico, la escoria de acero presenta características adecuadas para su utilización como sustituto parcial del agregado grueso.

Absorción

La escoria de acero presentó una absorción de 2.10 %, superior a la registrada para el agregado convencional (0.98 %). Este comportamiento puede atribuirse a la mayor porosidad superficial característica de este tipo de materiales. Aunque una mayor absorción implica una mayor demanda potencial de ligante asfáltico, el valor obtenido se mantiene dentro de rangos compatibles con aplicaciones en pavimentos flexibles. En este estudio, el ajuste del contenido de asfalto permitió compensar dicha condición sin afectar el desempeño de la mezcla, evidenciando que este aspecto puede ser considerado durante el proceso de diseño.

Adherencia

Los resultados de adherencia mostraron que ambos materiales satisfacen el requisito mínimo establecido por la normativa. No obstante, la escoria de acero alcanzó un valor de adherencia de 98 %, ligeramente superior al 95 % obtenido para el agregado convencional. Esta diferencia puede estar asociada con la textura superficial más rugosa y angular de la escoria, que favorece la interacción mecánica entre el agregado y el ligante asfáltico. El mayor porcentaje de adherencia obtenido para la escoria indica una interacción favorable entre el agregado y el ligante bajo las condiciones específicas del ensayo realizado. Sin embargo, este resultado no permite, por sí solo, establecer la resistencia de la mezcla al daño inducido por humedad ni demostrar la ausencia de desprendimiento, o stripping, bajo condiciones de servicio, cuya evaluación requiere ensayos específicos de susceptibilidad a la humedad y desempeño.

Abrasión

La pérdida por abrasión registrada para la escoria de acero fue de 26.6 %, mientras que el agregado convencional presentó un valor de 22.2 %, lo que representa una pérdida ligeramente mayor en la escoria bajo las condiciones del ensayo. Esta diferencia indica que, aunque la escoria presenta una mayor susceptibilidad al desgaste que el agregado convencional, ambos materiales se mantuvieron por debajo del límite máximo establecido por la normativa. Por tanto, la mayor pérdida de masa observada en la escoria no implica, bajo las condiciones evaluadas, un incumplimiento de los criterios normativos para su empleo como agregado. Desde el punto de vista de la durabilidad superficial, este resultado sugiere que la escoria puede presentar un desgaste ligeramente mayor ante acciones abrasivas; sin embargo, al encontrarse dentro del límite normativo, esta diferencia no constituye por sí misma una evidencia de un desempeño inadecuado. La evaluación de la durabilidad superficial en condiciones de servicio requeriría considerar, además, otros factores y ensayos específicos de desempeño.

Flujo

La mezcla modificada con escoria de acero presentó un flujo de 3.2 mm, ligeramente inferior al registrado por la mezcla convencional (3.5 mm). Esta reducción indica una menor deformación plástica de la probeta durante el ensayo Marshall y puede asociarse con una mayor rigidez de la estructura interna de la mezcla bajo las condiciones específicas de carga y temperatura del ensayo. Ambos valores se encuentran dentro del intervalo de flujo considerado aceptable por la metodología Marshall, lo que indica que las mezclas presentan una respuesta adecuada bajo las condiciones evaluadas. No obstante, este resultado debe interpretarse únicamente en el contexto del ensayo Marshall, ya que el valor de flujo, por sí solo, no permite establecer directamente la resistencia al ahuellamiento, la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga ni el comportamiento viscoelástico de la mezcla bajo cargas repetidas en condiciones de servicio. La evaluación de estos mecanismos requeriría ensayos de desempeño específicos.

Estabilidad

La incorporación de escoria de acero produjo un incremento en la estabilidad Marshall, pasando de 1054 kg en

la mezcla convencional a 1415 kg en la mezcla modificada, lo

Tabla 4. Resultados experimentales de estabilidad y flujo Marshall

Propiedad	Mezcla	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Estabilidad (kgf)	Tradicional	1048	1054	1060
	Modificada	1410	1420	1415
Flujo (mm)	Tradicional	3.3	3.4	3.8
	Modificada	3.0	3.2	3.4

que representa un aumento cercano al 34 %. Este incremento indica una mayor capacidad de la mezcla modificada para resistir la carga aplicada durante el ensayo Marshall antes de alcanzar la deformación correspondiente a la falla. Este comportamiento puede estar relacionado con la interacción entre el agregado y el ligante, así como con las características físicas y la estructura granular de la escoria de acero. Además, ambos valores superaron el mínimo normativo de 510 kg, lo que indica que las mezclas evaluadas cumplen con el criterio de estabilidad establecido para las condiciones consideradas. No obstante, estos resultados corresponden específicamente al comportamiento de las mezclas bajo las condiciones del ensayo Marshall y no permiten, por sí solos, establecer una mayor capacidad estructural del pavimento completo ni predecir directamente su desempeño en condiciones de servicio.

En términos generales, los resultados obtenidos muestran que la sustitución parcial del agregado grueso por 15 % de escoria de acero no afectó negativamente las propiedades físicas evaluadas y estuvo asociada con mejoras en los parámetros mecánicos determinados mediante el ensayo Marshall. Aunque se observó un incremento en la absorción y en la pérdida por abrasión respecto al agregado convencional, ambos parámetros permanecieron dentro de los límites establecidos por la normativa aplicable, mientras que la escoria presentó mayores valores de adherencia y estabilidad Marshall. En conjunto, los resultados sugieren que, bajo las condiciones y procedimientos de laboratorio considerados en esta investigación, la incorporación de 15 % de escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso presenta un comportamiento técnicamente aceptable respecto de las propiedades evaluadas. No obstante, estos resultados no permiten establecer por sí solos su desempeño integral en condiciones de servicio, por lo que serían necesarios ensayos adicionales de desempeño y evaluaciones bajo condiciones representativas de campo para determinar su comportamiento a largo plazo en pavimentos flexibles.

Análisis estadístico

La Tabla 4 presenta los resultados experimentales de estabilidad y flujo obtenidos mediante el ensayo Marshall para la mezcla tradicional y la mezcla modificada. Para cada condición se evaluaron tres especímenes (n = 3).

A partir de los valores experimentales se calcularon la media y la desviación estándar. Asimismo, las diferencias entre ambas mezclas fueron evaluadas mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA), considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Los resultados se resumen en la Tabla 5, cabe resaltar que se consideraron diferencias estadísticamente significativas para $p < 0.05$ y que la variación porcentual se calculó respecto a la mezcla tradicional.

Tabla 5. Comparación estadística de la estabilidad y el flujo de las mezclas asfálticas. DE: desviación estándar.

Propiedad	**Tradicional (media ±DE)**	**Modificada (media ±DE)**	**Variación (%)**	***F (1,4)***	***p***	**Resultado**
Estabilidad (kgf)	1054.0 ± 6.0	1415 ± 5.0	+34.25	6409.23	< 0.001	Significativo
Flujo (mm)	3.50 ± 0.26	3.20 ± 0.20	-8.57	2.45	0.192	No significativo

La mezcla modificada presentó una estabilidad promedio de 1415.0 ± 5.0 kgf, frente a 1054.0 ± 6.0 kgf de la mezcla tradicional. Esto representa un incremento del 34.25 %. El análisis estadístico confirmó que esta diferencia fue significativa [$F(1,4) = 6409.23$, $p < 0.001$]. Además, la baja dispersión observada entre los especímenes de cada grupo muestra que los resultados fueron consistentes. Bajo las condiciones evaluadas, estos resultados indican que la modificación favoreció la estabilidad Marshall de la mezcla asfáltica.

En el caso del flujo se observó una disminución de 3.50 ± 0.26 mm para la mezcla tradicional a 3.20 ± 0.20 mm para la modificada, equivalente a una reducción del 8.57 %. Sin embargo, esta diferencia no alcanzó significancia estadística [$F(1,4) = 2.45$, $p = 0.192$]. Por lo tanto, aunque los valores muestran una tendencia hacia un menor flujo en la mezcla modificada, con los resultados disponibles no puede afirmarse que esta variación sea consecuencia directa de la modificación.

Este comportamiento resulta relevante al analizar conjuntamente ambas propiedades. El aumento significativo de la estabilidad indica una mayor capacidad de la mezcla modificada para soportar carga durante el ensayo Marshall, mientras que los resultados de flujo no muestran evidencia estadística suficiente de un cambio asociado con la modificación. Por ello, la mejora observada en la estabilidad no debe interpretarse automáticamente como una modificación significativa del comportamiento de deformación de la mezcla. En conjunto, los resultados muestran que la modificación produjo un incremento estadísticamente significativo de la estabilidad Marshall, mientras que la disminución observada en el flujo no alcanzó significancia estadística. Por lo tanto, bajo las condiciones experimentales estudiadas, el efecto más

Tabla 7. Comparación de resultados con otras investigaciones en el Ensayo Marshall

Autor/ Ensayo	Este articulo	Moncayo (2023)	Calva y Muñoz (2022)	Cosio y Franco (2023)	Siclane (2019)
Estabilidad (kg)	1415	1334	1505	1124	1136
Flujo (mm)	3.2	3.4	13.59	3.12	3.5

evidente de la modificación fue el aumento de la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir carga.

4.2. Comparación con estudios previos

Antes de realizar la comparación de los valores de estabilidad y flujo obtenidos en la presente investigación con los reportados en estudios previos, es importante considerar las condiciones metodológicas bajo las cuales fueron desarrolladas las investigaciones analizadas. Como se muestra en la Tabla 6, los cuatro estudios considerados emplearon porcentajes de sustitución de agregado grueso por escoria de acero comprendidos entre 5 y 25 %, mientras que el contenido de ligante asfáltico varió entre 4% y 8%. Asimismo, se identificaron granulometrías de los agregados gruesos con características similares y, en la mayoría de los casos, criterios de dosificación asociados con especificaciones reconocidas, entre ellas la ASTM D3515. Cabe destacar que las cuatro investigaciones emplearon el método Marshall para la compactación de las briquetas y recurrieron a criterios normativos internacionalmente reconocidos, principalmente de las normas ASTM y AASHTO. Estas coincidencias en los porcentajes de sustitución, contenido de ligante, características granulométricas, método de compactación y criterios normativos proporcionan una base metodológica comparable que permite contextualizar los valores de estabilidad y flujo obtenidos en la presente investigación respecto de los reportados en los estudios seleccionados, reconociendo que las diferencias en la procedencia y características de las escorias, así como en otros parámetros particulares del diseño de las mezclas, pueden influir en los resultados.

La Tabla 7 resume esta comparación, permitiendo identificar similitudes y diferencias asociadas a las características de los materiales, las condiciones de diseño de mezcla y los procedimientos de evaluación utilizados. A continuación, se analizan los resultados correspondientes a cada parámetro.

En términos de estabilidad Marshall, la mezcla desarrollada en este estudio alcanzó un valor de 1215 kg, ubicándose por encima de los resultados reportados por Cosio y Franco (1124 kg) y Siclane (1136 kg), con incrementos del 8.1 % y 6.9 %, respectivamente. Por otro lado, el valor obtenido fue inferior al registrado por Moncayo (1334 kg) y Calva y Muñoz (1505 kg), con diferencias de 8.9 % y 19.3 %, respectivamente. A pesar de estas variaciones, todos los estudios reportan valores superiores al mínimo exigido por la metodología Marshall, lo que confirma la capacidad estructural de las mezclas que incorporan escoria de acero.

Las diferencias observadas entre investigaciones pueden explicarse por las características particulares de los materiales empleados y del diseño de mezcla. En la presente investigación, la escoria de acero presentó una absorción de agua del **2.1 %** y una adherencia del **98 %**, propiedades que

Tabla 6. Criterios utilizados en anteriores investigaciones

Investigación	**Tipo de escoria**	**% de sustitución**	**Contenido de ligante**	**Granulometría**	**Método de compactación**	**Criterios normativos principales**
Moncayo (2023)	Escoria de alto horno	5 %, 8 %, 12 % y 15 %	4.5 %, 5.0 %, 5.5 % y 6.0 %	NTP 400-012; tamices de 3" a N.º 4 y de N.º 4 a N.º 200	Marshall	ASTM D1559 ASTM D6927 AASHTO T245-97
Calva y Muñoz (2022)	Escoria de acero	15 %, 25%	4.0 %, 4.5 %, 5.0 %	MAC-2; tamices de ¾" a N.º 200	Marshall	ASTM C131 ASTM C127 ASTM D4541 ASTM 6926
Cosío y Franco (2023)	Escoria de acero	5 %, 10 % y 15 %	8.0 % y 8.2 %	ASTM D3515; tamices de 3/8", N.º 4, 8, 16, 30, 50 y 200	Marshall	AASHTO T-27 ASTM D1559 ASTM D6927
Siclane (2019)	Escoria de acero	3 %, 10 % y 17 %	4.0 %, 4.5 %, 5.0 %, 5.5 % y 6.0 %	ASTM D3515; tamices de ½", 3/8", N.º 4, 8, 16, 30, 50 y 200	Marshall	ASTM D3515 ASTM D1559 AASHTO T245 EG-2013/MTC

favorecen una adecuada interacción con el ligante asfáltico y contribuyen al incremento de la estabilidad Marshall. En contraste, Calva Herrera y Muñoz Pérez (2022) reportaron una absorción del **2.4 %**, valor superior al obtenido en este estudio, lo que puede reflejar una mayor porosidad del agregado y una mayor demanda de ligante asfáltico. Asimismo, las diferencias en la procedencia de la escoria, la granulometría utilizada y el porcentaje de sustitución influyen en la estructura interna de la mezcla y en la distribución de esfuerzos entre los agregados. En este contexto, los valores de estabilidad y flujo obtenidos en la presente investigación se encuentran dentro del intervalo reportado por la literatura, lo que evidencia un comportamiento mecánico consistente bajo condiciones experimentales comparables.

Respecto al flujo Marshall, la mezcla evaluada presentó un valor de 3.2 mm, muy similar a los reportados por Moncayo (3.4 mm), Cosio y Franco (3.12 mm) y Siclane (3.5 mm). La diferencia máxima entre estos estudios fue inferior al 10 %, lo que evidencia una respuesta mecánica comparable y una adecuada capacidad de deformación antes de la falla.

Desde el punto de vista ingenieril, un flujo de 3.2 mm indica que la mezcla posee un comportamiento viscoelástico equilibrado, al combinar suficiente rigidez para resistir deformaciones permanentes con la flexibilidad necesaria para disipar los esfuerzos inducidos por cargas repetidas del tránsito. Este comportamiento contribuye a disminuir la susceptibilidad a la formación de roderas (*rutting*) sin incrementar el riesgo de agrietamiento por fragilidad, favoreciendo así un desempeño estructural adecuado en pavimentos sometidos a cargas dinámicas (Roberts, Kandhal, Brown, Lee y Kennedy, 1996; Huang, 2004).

El valor de flujo reportado por Calva Herrera y Muñoz Pérez (2022), de 13.59 mm, difiere considerablemente del resto de las investigaciones analizadas y es aproximadamente cuatro veces superior al promedio de los demás estudios. Este resultado refleja una mayor deformación de la probeta durante el ensayo Marshall y podría estar relacionado con diferencias en el diseño de la mezcla, el contenido de ligante, la granulometría o las características físicas de los materiales empleados. En comparación con la presente investigación, una posible explicación de esta diferencia podría estar asociada con la absorción de agua de la escoria de acero, que en el estudio de Calva Herrera y Muñoz Pérez (2022) fue de 2.4 %, superior al valor de 2.1 % considerado en este estudio. Una mayor absorción puede estar relacionada con una estructura más porosa del agregado y con una mayor demanda de ligante para recubrir su superficie; sin embargo, con los datos disponibles no es posible establecer que esta característica haya sido la causa del elevado valor de flujo obtenido. Por ello, la diferencia observada debe considerarse como una posible asociación, en conjunto con otros factores propios del diseño y de los materiales utilizados, y no como una relación causal confirmada. En consecuencia, la comparación directa de este resultado debe realizarse con cautela.

4.3. Conclusiones a partir de la literatura existente

En conjunto, los resultados obtenidos muestran que la mezcla modificada con escoria de acero desarrollada en esta investigación presenta un comportamiento equilibrado entre capacidad portante y deformabilidad. La estabilidad Marshall alcanzó un valor de 1215 kg, superior al mínimo establecido para mezclas asfálticas densas, lo que evidencia una adecuada resistencia a las cargas aplicadas y una elevada capacidad para soportar esfuerzos sin presentar falla por corte. Por su parte, el flujo Marshall fue de 3.2 mm, valor que se encuentra dentro del intervalo recomendado por la metodología Marshall, indicando que la mezcla conserva una capacidad de deformación suficiente para disipar los esfuerzos inducidos por el tránsito sin desarrollar deformaciones permanentes excesivas. En conjunto, ambos parámetros evidencian un equilibrio entre rigidez y flexibilidad, condición indispensable para favorecer el desempeño estructural del pavimento y reducir la susceptibilidad tanto al ahuellamiento como al agrietamiento prematuro (ASTM, 2022; Huang, 2004).

La estabilidad alcanzada se encuentra dentro del rango reportado por estudios previos, mientras que el flujo permanece dentro de los valores comúnmente aceptados para mezclas asfálticas diseñadas mediante la metodología Marshall. Estos hallazgos confirman la viabilidad técnica de emplear escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en pavimentos flexibles.

5. Conclusiones

La escoria de acero evaluada presentó características físicas compatibles con su uso como sustituto parcial del agregado grueso en mezclas asfálticas. Los resultados de granulometría, adherencia y resistencia a la abrasión cumplieron con los requisitos normativos aplicables, mientras que la absorción fue superior a la del agregado convencional. No obstante, este comportamiento puede ser considerado durante el diseño de la mezcla mediante ajustes en el contenido de ligante asfáltico.

La incorporación de un 15 % de escoria de acero produjo mejoras en los parámetros Marshall evaluados. La estabilidad aumentó de 1054 kg a 1415 kg, lo que representa un incremento aproximado del 34 %, mientras que el flujo disminuyó de 3.5 mm a 3.2 mm, manteniéndose ambos valores dentro de los criterios establecidos por la metodología Marshall. Este comportamiento puede relacionarse con las características morfológicas de la escoria de acero, particularmente con su elevada angularidad, forma irregular y textura superficial rugosa. Liu y otros (2022), mediante análisis de imágenes y tomografía computarizada, observaron que la mayor angularidad de las partículas de escoria favorece un incremento en los puntos de contacto y modifica las características del esqueleto granular de las mezclas asfálticas, mientras que Wang y otros (2024) determinaron que la

angularidad de la escoria incrementa el número de contactos entre partículas y que su textura rugosa y forma no esférica favorecen una mayor longitud de contacto dentro del esqueleto de la mezcla. Estas características pueden favorecer el entrelazamiento mecánico (interlocking) y una estructura granular con mayor capacidad para resistir y transferir las cargas aplicadas, lo que proporciona una posible explicación para el incremento de la estabilidad Marshall observado en la presente investigación.

La escoria de acero mostró una adherencia del 98 %, superior al 95 % registrado para el agregado convencional. Esta mayor afinidad entre el agregado y el ligante asfáltico favorece la formación de una interfase árido-ligante más estable, reduciendo la susceptibilidad al desprendimiento del ligante y contribuyendo al incremento de la estabilidad mecánica observado en la mezcla modificada.

La comparación con estudios previos mostró que los valores de estabilidad y flujo obtenidos en la presente investigación se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura para mezclas asfálticas con incorporación de escoria de acero. Esta correspondencia permite identificar una tendencia consistente con los resultados obtenidos por otros investigadores y proporciona un referente favorable para la interpretación de los resultados de este estudio. No obstante, las diferencias en las características de los materiales, los porcentajes de sustitución, el contenido de ligante, la granulometría y las condiciones experimentales empleadas en cada investigación deben considerarse al realizar la comparación, por lo que la coincidencia con estudios previos no constituye por sí misma una validación completa de los resultados. En este sentido, los resultados obtenidos muestran concordancia con antecedentes experimentales y respaldan, dentro de las condiciones evaluadas, el comportamiento de la escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, el aprovechamiento de escoria de acero en mezclas asfálticas representa una alternativa para valorizar un subproducto industrial y reducir parcialmente la demanda de agregados naturales. Sin embargo, la magnitud de los beneficios ambientales asociados a esta sustitución no fue cuantificada en la presente investigación, por lo que se recomienda desarrollar estudios futuros que incorporen análisis de ciclo de vida y evaluación de impacto ambiental.

Asimismo, la superficie rugosa y porosa de la escoria puede favorecer la interacción con el ligante asfáltico. Moura y otros (2020), mediante técnicas de caracterización superficial, análisis de energía superficial y microscopía de fuerza atómica, demostraron que las características superficiales y la composición química de la escoria influyen en la adhesión entre el agregado y el ligante. De manera complementaria, Xu y otros (2024) emplearon microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía de energía dispersiva (EDS) y tomografía computarizada (CT), encontrando que los poros superficiales de la escoria permiten la penetración y anclaje del ligante, mientras que una mayor cantidad de puntos de contacto en el esqueleto se relacionó con una mayor estabilidad de la mezcla. Por tanto, la combinación de angularidad, textura rugosa, porosidad superficial y características de la interfase agregado-ligante constituye una explicación técnicamente sustentada para el comportamiento observado; sin embargo, dado que estas características no fueron caracterizadas directamente en la escoria empleada en la presente investigación, su contribución específica debe interpretarse como un mecanismo propuesto con base en los antecedentes disponibles y no como una relación causal demostrada experimentalmente en este estudio.

Finalmente, aunque los resultados obtenidos evidencian un comportamiento favorable de la mezcla modificada bajo los criterios de evaluación Marshall, se recomienda complementar esta investigación con ensayos de susceptibilidad a la humedad, deformación permanente, fatiga y módulo resiliente, con el fin de ampliar el conocimiento sobre el desempeño de la escoria de acero bajo condiciones representativas de servicio en pavimentos flexibles.

5.1. Limitaciones

Los resultados obtenidos permiten establecer una evaluación preliminar del comportamiento de la escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en mezclas asfálticas; sin embargo, es importante considerar las siguientes limitaciones:

1. Condiciones de evaluación a escala de laboratorio. Los ensayos fueron realizados bajo condiciones controladas y mediante la metodología Marshall, por lo que los resultados representan el comportamiento inicial de la mezcla. No se incluyeron evaluaciones bajo condiciones reales de servicio, tales como variaciones climáticas, cargas repetidas de tránsito o procesos de deterioro asociados al ambiente.

2. Origen del material. La escoria de acero utilizada en esta investigación provino de una única fuente de suministro, por lo que sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas corresponden únicamente a ese material. Debido a que la composición de las escorias puede variar en función del proceso siderúrgico, la materia prima empleada y las condiciones de enfriamiento, los resultados obtenidos reflejan el comportamiento específico de la escoria evaluada y no pueden generalizarse directamente a escorias de acero provenientes de otras plantas o procesos de fabricación. En consecuencia, se recomienda que futuras investigaciones evalúen materiales de diferentes orígenes para determinar la influencia de la variabilidad metalúrgica sobre el desempeño de las mezclas asfálticas.

3. Tamaño de muestra experimental. La evaluación mecánica se realizó mediante tres especímenes para cada condición de mezcla, cantidad suficiente para cumplir con los procedimientos establecidos en la metodología Marshall. Sin embargo, estudios futuros podrían incrementar el número de réplicas e incorporar análisis estadísticos más robustos con el fin de reducir la incertidumbre experimental y fortalecer la representatividad de los resultados.

4. Desempeño a largo plazo. La investigación se centró en la caracterización física de los materiales y en la evaluación mecánica inicial de las mezclas asfálticas. No se realizaron ensayos relacionados con envejecimiento, susceptibilidad a la humedad, fatiga, deformación permanente

o estabilidad volumétrica, aspectos fundamentales para estimar el desempeño a largo plazo de los pavimentos.

5. Evaluación ambiental. Aunque la incorporación de escoria de acero representa una estrategia de valorización de residuos industriales y reducción parcial del consumo de agregados naturales, el estudio no incluyó una cuantificación de los beneficios ambientales asociados. Por ello, se recomienda complementar futuras investigaciones mediante análisis de ciclo de vida, huella de carbono y evaluación de impactos ambientales para determinar de manera objetiva las ventajas de sostenibilidad derivadas de su utilización.

Estas limitaciones no invalidan los resultados obtenidos, sino que delimitan el alcance de las conclusiones presentadas y establecen líneas de investigación futuras para profundizar en el conocimiento del comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con escoria de acero.

5.2. *Recomendaciones*

Se recomienda complementar los resultados obtenidos mediante estudios de campo y evaluaciones de desempeño a largo plazo, incorporando ensayos de durabilidad, susceptibilidad a la humedad, fatiga y deformación permanente. Asimismo, resulta conveniente analizar diferentes porcentajes de sustitución de escoria de acero y desarrollar evaluaciones ambientales cuantitativas que permitan determinar los beneficios asociados a la reducción del consumo de agregados naturales y la valorización de residuos siderúrgicos.

Debe considerarse que el análisis estadístico se realizó con tres especímenes por condición, lo cual limita la capacidad estadística para detectar diferencias pequeñas, particularmente en el flujo. En consecuencia, el valor de p = 0.192 no demuestra que ambas mezclas sean equivalentes; únicamente indica que, con el tamaño muestral utilizado, la diferencia observada no alcanzó significancia estadística. Se recomienda realizar un mayor número de réplicas, lo cual permitiría evaluar con mayor precisión esta tendencia.

6. Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial generativa y tecnologías asistidas por IA.

Durante la preparación del presente manuscrito, los autores utilizaron la inteligencia artificial de ChatGPT para corrección gramatical. Todo el contenido generado o sugerido por la herramienta fue revisado y editado por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la exactitud, originalidad, integridad y rigor científico del contenido final del manuscrito.

Referencias

Ahmedzade, P., y Sengoz, B. (2009). Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. Journal of Hazardous Materials, 165(1-3), 300-305. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.105

Ameri, M., Hesami, S., y Goli, H. (2013). Evaluación en laboratorio de mezclas asfálticas tibias que contienen escoria de horno de arco eléctrico. Construction and Building Materials, 49, 611-617. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.034

Behnood, A., Ameri, M., y Yousefi, A. A. (2023). Moisture susceptibility and durability of asphalt mixtures incorporating steel slag aggregates. Journal of Materials in Civil Engineering, 35(4), 04023018. https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-15428

Benavides, D., Rangel, R. L., Franci, A., y Aponte, D. (2024). Effect of steel slag on compaction times of asphalt mixtures based on prediction of cooling curves. Construction and Building Materials, 421, 135550. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135550

Calva Herrera, L. O., y Muñoz Pérez, S. P. (2022). Estabilidad de mezclas asfálticas con escorias. Infraestructura Vial, 24(43), 83-93. https://revistas.ucr.ac.cr

Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero (CANACERO). (2022). Radiografía de la industria del acero en México. https://www.canacero.org.mx

Cosio Huillca, S. F., y Franco Centeno, R. P. (2023). Diseño de pavimento flexible agregando escoria de acero como mejora de infraestructura vial en las Lomas, Ventanilla alta, 2023.

Georgiou, P., y Loizos, A. (2021). Characterization of sustainable asphalt mixtures containing high reclaimed asphalt and steel slag. Materials, 14(17), 4938. https://doi.org/10.3390/ma14174938

Guo, X., Shi, H., y Dick, W. A. (2021). Comprehensive utilization of steel slag: A review. Construction and Building Materials, 287, 122909. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122909

Huang, Y. H., Bird, R. N., y Bell, C. A. (2021). Pavement Analysis and Design (3.ª ed.). Pearson.

Instituto Mexicano del Transporte (IMT). (2025). Normativa para la Infraestructura del Transporte NIT-SICT. https://www.gob.mx/sict

Kavussi, A. y Qazizadeh, M. J. (2014). Fatigue characterization of asphalt mixes with EAF steel slag. Construction and Building Materials, 72, 158-166. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.026

Li, J., Yu, J., Wu, S., y Xie, J. (2022). The mechanical resistance of asphalt mixture with steel slag to deformation and skid degradation based on laboratory accelerated heavy loading test. Materials, 15(3), 911. https://doi.org/10.3390/ma15030911

Liu, P., Chen, Y., y Wang, D. (2023). Performance evaluation of asphalt mixtures containing blast furnace slag aggregates. Materials, 16(4), 1587. https://doi.org/10.3390/ma16041587

Luan, Y., Zhang, W., Zhao, Y., Pan, Z., Niu, Z., Zeng, K., Chen, X., y Mohammad, L. N. (2022). Mechanical property evaluation for steel slag in asphalt mixture with different skeleton structures using modified Marshall mix design methodology. Journal of Materials in Civil Engineering, 34(1), 04021382. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004014

Moncayo Ylma, C. A. (2023). Influencia de la escoria metalúrgica en pavimentos flexibles [Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería]. http://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/4567

Moura, C. F. N., Nascimento, L., Loureiro, C., Rodrigues, M., Oliveira, J. R. M., y Silva, H. M. R. D. (2022). Viability of using high amounts of steel slag aggregates to improve the circularity and performance of asphalt mixtures. Applied Sciences, 12(1), 490. https://doi.org/10.3390/app12010490

Pasetto, M., Baliello, A., Giacomello, G., y Pasquini, E. (2022). Sustainable road asphalt mixtures containing steel slag aggregates: Mechanical performance and durability. Materials, 15(3), 1024. https://doi.org/10.3390/ma15031024

Pérez-Rojas, Y. A., y Vera-López, E. (2021). Resistencia a compresión de concreto con escoria de horno de arco eléctrico y vidrio molido reciclado en remplazo del agregado grueso y fino. Revista Ingeniería de Construcción, 36(3), 342–360.

Plati, C., Tsakoumaki, M., y Loizos, A. (2024). Quality Assurance of Steel Slag Asphalt Mixtures for Sustainable Pavement Surface Courses. Recycling, 9(5), 91. https://doi.org/10.3390/recycling9050091

Porras, R., Pérez, D., y colaboradores. (2021). Bituminous base courses for flexible pavements with steel slags. Transportation Research Procedia, 58, 83–89. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.11.012

Rogel Ramírez, A. C., y Zamora Plata, J. A. (2023). Desarrollo de una pintura a partir de escoria de aceración para calentamiento solar de agua. Ingeniería, Investigación y Tecnología, 24(4), 1–11. https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2023.24.4.023

Siclane Smith, L. S. (2019). Aplicación de escoria siderúrgica para rehabilitar pavimentos flexibles en el Distrito de La Victoria–Lima 2018 [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional UCV. https://hdl.handle.net/20.500.12692/46148

Wang, Q., Yan, P., y Yang, J. (2022). Recycling and utilization of slags in civil and environmental applications: A review. Journal of Cleaner Production, 350, 131537. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131537

Zaabar, I., y Chatti, K. (2014). Estimating vehicle operating costs caused by pavement surface conditions. Transportation Research Record, 2455(1), 63-76. https://doi.org/10.3141/2455-08

Zhang, T., Ding, Y., y Gao, X. (2021). Classification, characteristics and resource utilization of metallurgical slags. Minerals Engineering, 170, 107040. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107040

Zhang, Y., Liu, S., y Wu,K. (2022). Mechanical and microstructural properties of blast furnace slag-based materials for pavement engineering. Case Studies in Construction Materials, 17, e01435. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01435

Ziari, H., Nowbakht, S., Rezaei, S., y Mahboob, A. (2015). Laboratory investigation of fatigue characteristics of asphalt mixtures with steel slag aggregates. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 623245. https://doi.org/10.1155/2015/623245

Apéndice A.

Tabla 8. Tipo de composición de la muestra de ensayo. Nota: La escoria de acero fue suministrada por una empresa siderúrgica nacional cuya identidad permanece confidencial a solicitud del proveedor

Tipo de composición de la muestra	Intervalo de tamaños		Masa de la fracción (g)	Carga abrasiva	
	mm	Designación		Número de esferas	Masa total (g)
A	37.5-25	1½" - 1"	1250 ± 25	12	5000 ± 25
	25-19	1" - ¾"	1250 ± 25		
	19-12.5	¾" - ½"	1250 ± 10		
	12.5-9.5	½" - ⅜"	1250 ± 10		
	Masa total de la muestra de ensayo		5000 ± 10		
B	19-12.5	¾" - ½"	2500 ± 10	11	4584 ± 25
	12.5-9.5	½" - ⅜"	2500 ± 10		
	Masa total de la muestra de ensayo		5000 ± 10		
C	9.5-6.3	⅜" - ¼"	2500 ± 10	8	3330 ± 20
	6.3-4.75	¼" - N°4	2500 ± 10		
	Masa total de la muestra de ensayo		5000 ± 10		
D	4.75-2.0	N°4 - N°10	5000 ± 10	6	2500 ± 15
E	75-63	3" - 2½"	2500 ± 50	12	5000 ± 25
	63-50	2½" - 2"	2500 ± 50		
	50-38.1	2" - 1½"	5000 ± 50		