

Uso de las escorias de horno de arco eléctrico (EHAE) en la construcción – estado del arte

Use of electric arc furnace slag (EAFS) in construction - state of the art

Manuel Alejandro Rojas-Manzano ^{1a}, Iván Fernando Otálvaro-Calle ^{1b},
Javier Alexander Pérez-Caicedo ^{1c}, Héctor Mauricio Benavides ^{1d}, Carlos Ambriz-Fregoso ²

¹Grupo de investigación SIGMA, Departamento de Ingeniería Civil e Industrial, Pontificia Universidad Javeriana de Cali, Colombia. Orcid: ^a 0000-0001-5783-9112, ^b 0000-0003-3665-4244.

Correos electrónicos: ^a alejandro.rojas@javerianacali.edu.co, ^b ifotalvaro@javerianacali.edu.co,
^c javier.perez@javerianacali.edu.co, ^d hector.benavides@javerianacali.edu.co

² Instituto Tecnológico de Tecpac, México. Correo electrónico: carlosambriz@ittec.edu.mx

Recibido: 11 julio, 2020. Aceptado: 20 noviembre, 2020. Versión final: 2 enero, 2021.

Resumen

El aumento de la población mundial ha tenido como consecuencia el crecimiento de la industria de la construcción. Lo anterior, implica la explotación de recursos naturales no renovables y por ende un mayor impacto ambiental por la contaminación del suelo, el agua y el aire. Así, el desarrollo sostenible se ha convertido en una prioridad en la industria, por ejemplo, por medio de la incorporación de residuos en la cadena productiva. El acero puede producirse por dos métodos: el alto horno (se funden minerales de hierro) y el horno de arco eléctrico (se funde chatarra metálica reciclada). En este último, el proceso más utilizado en Colombia, se forma la escoria horno de arco eléctrico (EHAE). Este residuo representa una oportunidad de aprovechamiento en la construcción. Varias investigaciones han estudiado el uso de este material como agregado y como materia prima del cemento. Así mismo, su utilización como sustituto de material granular en la construcción de terraplenes, bases, subbases y capas de rodadura, siendo en el área de pavimentos donde mayor aplicación puede darse a la escoria. Este trabajo tiene como objetivo realizar una revisión actualizada del estado del arte sobre el uso de la EHAE en la construcción, para promover la implementación correcta y segura de este residuo y aportar a la sostenibilidad de la industria siderúrgica.

Palabras clave: escoria de horno de arco eléctrico; escoria de acería; sostenibilidad; material de construcción; agregados; pavimentos; concreto; cemento; base granular; subbase granular.

Abstract

The increase in the world population has resulted in the growth of the construction industry. This involves the exploitation of non-renewable natural resources and therefore a greater environmental impact by pollution of soil, water, and air. Thus, sustainable development has become a priority in the industry, with the objective of incorporating waste into the production chain. The methods for producing steel are the blast furnace (iron mining) and the electric arc furnace (recycled metal scrap). In the latter, the most widely used process in Colombia, the electric arc furnace slag (EAFS) is formed. This waste represents an opportunity for use in construction. Several investigations have studied the use of this material as an aggregate and as a cement raw material. In addition, its use as a substitute for granular material in the construction of embankments, bases, sub-bases and rolling layers, the greatest application of slag are the pavements. This work aims to carry out an updated review of the state of the art on the use of EAFS in construction to promote the correct and safe implementation of this waste and contribute to the sustainability of the steel industry.

Keywords: electric arc furnace slag; iron slag; sustainability; construction material, aggregates; pavements; concrete, cement; granular base; granular subbase.

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 - 8456, **CC BY-ND 4.0** 

Como citar: M. A. Rojas-Manzano, I. F. Otálvaro-Calle, J. A. Pérez-Caicedo, H. M. Benavides, C. Ambriz-Fregoso, "Uso de las escorias de horno de arco eléctrico (EHAE) en la construcción – estado del arte," *Rev. UIS Ing.*, vol. 20, no. 2, pp. 53-64, 2021, doi: [10.18273/revuin.v20n2-2021005](https://doi.org/10.18273/revuin.v20n2-2021005)

1. Introducción

La industria de la construcción experimenta una transformación hacia la sostenibilidad y el manejo responsable de los recursos, promovida por el crecimiento de la población. En este escenario, el acero toma relevancia al ser uno de los materiales más utilizados en el mundo, como se puede observar en la Figura 1 que muestra el crecimiento de la producción bruta de acero en millones de toneladas.

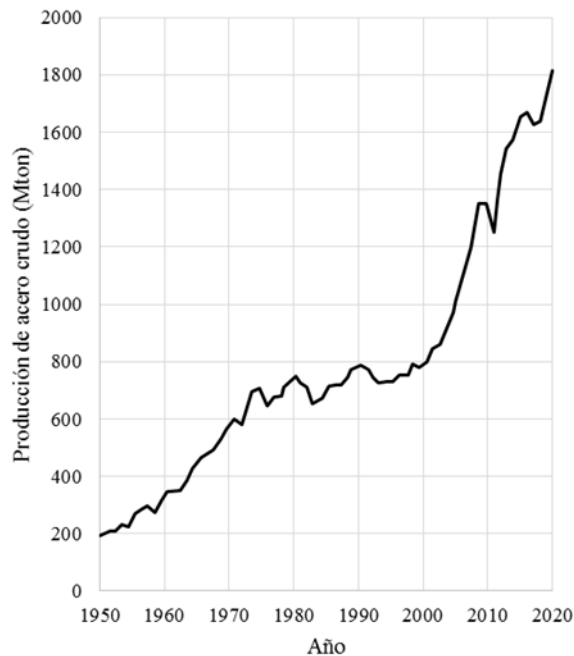


Figura 1. Producción mundial de acero crudo en millones de toneladas. Fuente: [1].

Este aumento de la producción trae desafíos en el área de la sostenibilidad como la disminución del impacto ambiental por la extracción de recursos naturales no renovables, la emisión de gases de efecto invernadero, la generación de residuos industriales y la consecuente contaminación del aire, suelo y recurso hídrico.

En este contexto, la industria del acero ha venido aplicando estrategias como el fomento de la producción por medio del reciclaje, el aumento de la eficiencia para la disminución de los residuos, la transformación de estos en subproductos para su reúso en otras industrias, la incorporación de nuevas tecnologías para reducir el consumo energético y emisiones, entre otras medidas, enfocadas en la sostenibilidad.

Con el objetivo de promover el uso de la EHAE en la construcción, se realizó una revisión del estado del arte por medio de la consulta de bases de datos científicas y

fuentes primarias documentadas. El artículo aborda al inicio, el proceso de fabricación del acero, así como la generación y clasificación de las escorias. Finalmente, se enfoca en el análisis de las aplicaciones de este residuo en la construcción y específicamente, en los estudios realizados en Colombia.

2. Proceso de fabricación del acero

Para la fabricación del acero se distinguen principalmente dos procesos, el primero se basa en la extracción de recursos naturales como el mineral de hierro. El segundo se enfoca en la utilización de material de reciclaje o chatarra.

Según cifras de la World Steel Association [2], el proceso a base de mineral de hierro representa un 74% de la producción mundial. Este se puede dividir en tres fases. La primera es la reducción del mineral de hierro a arrabio, donde en un alto horno se mezcla la materia prima con carbón/coque (reduce los óxidos de hierro del mineral) y roca caliza (elimina las impurezas). El hierro fundido con exceso de carbono se acumula en la parte inferior del horno y la escoria (impurezas) flota en la parte superior. La segunda fase, para producir acero de calidad, es el afinado donde se pueden emplear tres tipos de hornos: de reverbero, básico de oxígeno y eléctrico. Finalmente, se ejecuta la conformación del acero para fabricar los productos [3].

Para el restante de la producción mundial, se utiliza la tecnología de reciclaje de chatarra metálica, donde el acero se funde por medio de un horno eléctrico (usa un arco eléctrico entre electrodos de grafito). Posteriormente, se realiza el afinado en un horno tipo cuchara, donde se incorporan elementos de aleación y los agentes adicionales con el fin de obtener diferentes calidades de acero [4].

3. Tipos de escorias

Las escorias ferrosas son aquellas que se generan durante la producción y fundición de hierro y acero. Estas se pueden clasificar según el tipo de horno, como se presenta en la Figura 2. Las propiedades de la escoria dependen del proceso para producir el acero crudo, de las condiciones de enfriamiento de esta y de los procedimientos adicionales a realizar para darle un valor agregado al residuo.



Figura 2. Clasificación de las escorias. Fuente: [5].

En el proceso a base de mineral de hierro se producen, en la primera fase, la escoria de alto horno (EAH), que se pueden clasificar según la velocidad de enfriamiento en: enfriada por aire, granulada y expandida. Es importante anotar, que están compuesta principalmente (95%) por cuatro óxidos de: calcio, magnesio, silicio y aluminio [6]. Estas son ampliamente utilizadas como adición mineral para reemplazo de cemento [7-12], así como agregado para concreto y mortero [13-18].

Las escorias de acero son producidas cuando el hierro caliente se introduce en un horno básico de oxígeno y/o la chatarra a un horno de arco eléctrico, estos son los metales primarios para fabricar acero. En estos procesos se inyecta cal para que actúe como agente fundente y que se combine con los silicatos, óxidos de aluminio, óxidos de magnesio, óxidos de manganeso y ferritas para formar escoria de acero. Este residuo se vierte del horno en estado fundido, posteriormente, se enfría lentamente y se procesa para eliminar todos los metales libres y se organiza en diferentes productos para su posterior valorización [19].

Del proceso anterior, se pueden clasificar las escorias de acero en función del tipo de horno utilizado como: Escoria de Horno de Arco Eléctrico (EHAE) o también conocida como escoria negra (Figura 3), producida en la etapa de fundición de la chatarra; Escoria de Horno de Cuchara (EHC) o escoria blanca, producida en la etapa de afinado; y la Escoria de Horno Básico de Oxígeno (EHBO).

Cabe indicar que el proceso de fabricación de acero, utilizando chatarra metálica, tiene una influencia significativa en la variabilidad de la composición química de la EHAE, como se presenta en la Tabla 1.



Figura 3. Escoria de Horno de Arco Eléctrico (EHAE). Fuente: elaboración Propia.

Tabla 1. Comparativo de Composición Química Característica de los tipos de EHAE

Composición química	Acero inoxidable	Acero crudo
CaO	40-50	20-40
SiO ₂	25-30	10-20
Al ₂ O ₃	2-10	2-10
MgO	3-10	5-15
Fe (total)	0-2	20-40
SO ₃	0-2	0.1-0.5
MnO	1-3	2.5-5
TiO ₂	0-1	0.5-1
P ₂ O ₅	--	0.5-2
CaO libre	--	0.5

Fuente: [4].

Igualmente, en la Tabla 2 se muestra un resumen con las principales propiedades físicas de esta escoria.

Tabla 2. Propiedades físicas de la EHAE

Propiedad	FHWA [20]	Rohde et al. [21]	Maghool et al. [22]
Gravedad Específica	3.2-3.6	3.41-3.52	3.56
Densidad Bulk Compactada (kN/m ³)	16.3-19.6	25.7-27.2	17.1-20.2
Absorción (%)	<3	1.8-2.9	4.1
Desgaste - Máquina de los Ángeles (%)	20-25	37-41	29
Dureza Superficial - Escala de Mohs	6-7	--	--

Fuente: [20-22].

El proceso de enfriamiento, cualquiera que sea el método utilizado, toma relevancia en la EHAE debido a que permite que se formen las fases cristalinas del material. Igualmente, para promover la hidratación de compuestos expansivos como el C_aO y MgO libres, es fundamental que la escoria sea curada (exposición a condiciones ambientales) durante un tiempo prudencial y así evitar efectos adversos en su aplicación, especialmente la expansión.

4. Aplicaciones de la EHAE en la construcción

El procesamiento de hierro y acero representan hasta el 95% del total de la industria de fabricación de metales [23]. Adicionalmente, debido al impacto ambiental positivo que significa para la industria siderúrgica el proceso de fabricación por medio de la chatarra, toma importancia el estudio de posibles usos de las EHAE para viabilizar el aprovechamiento de estos subproductos. En Europa, según cifras del año 2016, la EHAE representa el 42.9% del total de los residuos siderúrgicos, donde se destaca su uso como agregado para la construcción de vías y mejoramiento de suelos [24]. Lo anterior, potenciado por la composición química de la escoria y por sus elevadas propiedades físicas y mecánicas.

4.1. Reemplazo de cemento

Debido a su composición química, la escoria tiene potencial como material para reemplazo de cemento Portland. Muhmood et al. [25] estudiaron el comportamiento cementante y puzolánico de dos tipos de EHAE, una recibida directamente de la planta de

producción de acero y otra con un tratamiento (refundición seguida de enfriamiento rápido en agua), para aumentar el contenido amorfo que tendría comportamiento hidráulico. Los autores realizaron reemplazos hasta del 30% de cemento por escoria y encontraron que no se afectaron las propiedades mecánicas y físicas del material cementicio cuando se utilizó hasta un 20% de sustitución, como se observa en la Figura 4.

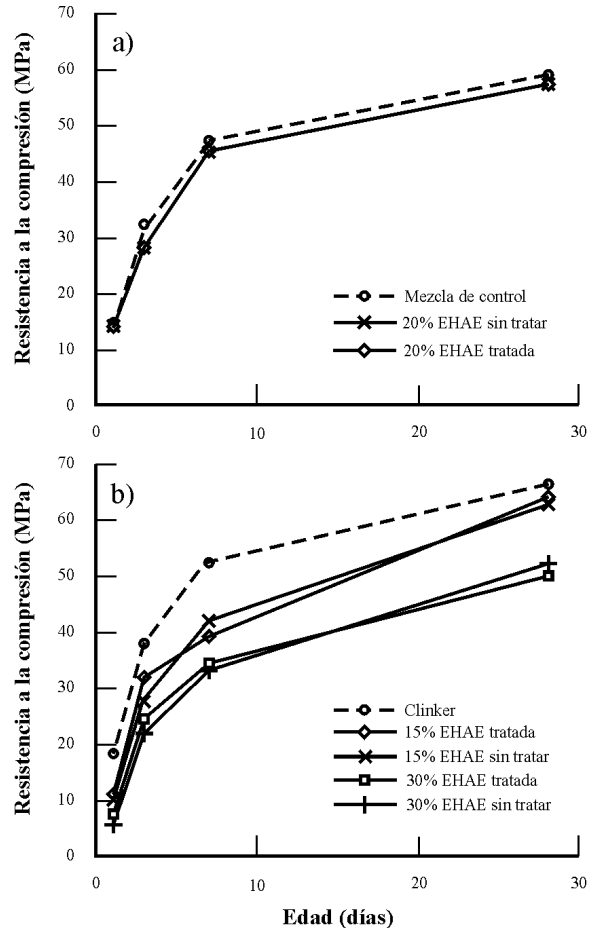


Figura 4. Resistencia a la compresión de cubos de mortero fabricados con: a) cemento de escoria de alto horno y sustitución de EHAE y b) cemento Portland puro y sustitución de EHAE. Fuente: [25].

Por otro lado, Tsakiridis et al. [26] evaluaron el efecto del uso del 10% de EHAE en la producción de cemento Portland. Encontraron que la escoria no influyó en la microestructura de la pasta, ni en la formación de las fases mineralógicas características. Del análisis de las propiedades físicas y mecánicas concluyen que la EHAE no afecta significativamente la calidad del cemento fabricado y puede ser utilizada como materia prima para la producción de cemento Portland.

Kim et al. [27] argumentan que las EHAE, que contienen más del 20% en peso de FeO, tienen un uso limitado como material suplementario para cemento. Debido a lo anterior, los autores realizaron un estudio sobre la fabricación de escoria disminuyendo el contenido de FeO por medio de un proceso de dos etapas, que incluía una reacción con residuo de Aluminio seguida de la reducción directa de carbono. Concluyen que la resistencia a la compresión utilizando EHAE y escorias de alto horno era comparable (25 MPa) después de 28 días de curado.

Serrato [28] fabricó morteros con sustitución hasta del 60% de cemento Portland por EHAE. Se realizaron pruebas de toxicidad a la escoria, así como de las propiedades mecánicas, microestructurales y de reacción álcali-silice a los morteros. La autora concluye que los reemplazos de 5% y 10% no producen efectos adversos en el mortero.

Debido a que se encontraron pocos estudios sobre la valorización de la EHAE como posible material para reemplazo de cemento Portland, es necesario que se promuevan investigaciones para viabilizar la aplicación de este residuo en la industria cementera.

4.2. Base y subbase granular

Estas capas granulares tienen como función proporcionar un apoyo uniforme a la rodadura, soportando cargas y distribuyendo los esfuerzos a la capa inmediatamente inferior. Por la estructura física de la vía, y la continua exposición que los materiales de la base y subbase tienen a la humedad, es necesario que, antes de comprobar sus características físico-mecánicas, se analice la toxicidad que la escoria pueda generar.

Un estudio experimental desarrollado por Otegi [29] evaluó la lixiviación de las escorias negras y blancas para su uso en capas granulares no ligadas. Concluyó que, para metales como el As, Cr, Mo y Pb, las concentraciones en lixiviados de todas las escorias estaban por debajo de los límites aceptables para ser valorizables. Sin embargo, las cantidades presentes de Zinc en la EHAE superan el límite inerte. De esta manera, recomienda la mezcla de las escorias con agregados pétreos naturales para el cumplimiento de las normativas ambientales.

Países como Brasil, Estados Unidos, Canadá, España y Japón ya utilizan la EHAE como sustitución del agregado natural en capas granulares como bases y subbases, debido al buen comportamiento mecánico que presenta la escoria. En Alemania, por ejemplo, aproximadamente el 97% de las escorias de acero producidas se han utilizado como agregados para la construcción de carreteras [30].

Behiry [31] evaluó la mezcla de EHAE con roca caliza como material de subbase en pavimentos flexibles. Determinó que con el incremento del porcentaje de escoria se aumentaron las propiedades mecánicas, como la densidad seca, el CBR y el módulo resiliente. Así mismo, mejora la resistencia a la deflexión y a la deformación vertical. La mezcla de mejor comportamiento fue la que contenía 70% de escoria y 30% de roca caliza.

Rohde et al. [21] estudiaron el uso de la escoria como material de base para vías de bajo tráfico. Los autores modificaron la granulometría de la EHAE y obtuvieron una escoria con gradación densa (DGS). El comportamiento elástico de este material se comparó con agregados pétreos tradicionales (Figura 5). Se observó que, para cualquier esfuerzo de confinamiento, el módulo resiliente de la DGS era más alto que el de los otros agregados. Este comportamiento elástico puede atribuirse a la forma de la escoria y a la superficie rugosa de las partículas.

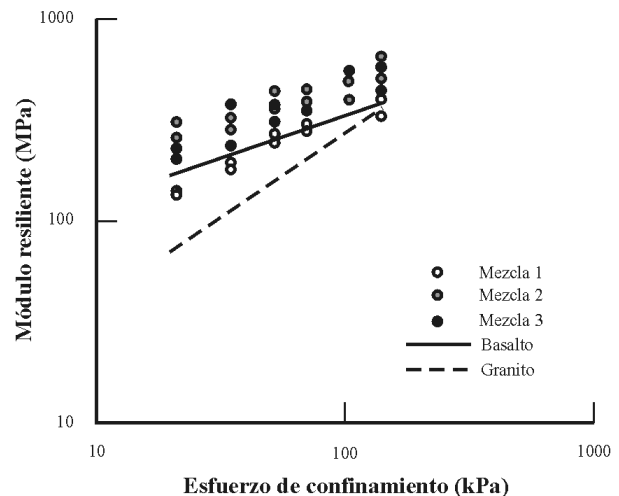


Figura 5. Módulos resilientes de DGS y de agregados para bases convencionales. Fuente: [21].

Maghool et al. [22] estudiaron el EHAE como material de construcción, el geomaterial clasificó como GW según el sistema unificado de clasificación de suelos, la respuesta ante cargas cíclicas con módulos de resiliencia entre 198 y 714 MPa, indican que este material puede ser empleado como material para la construcción de vías.

En Brasil, se han registrado con éxito la ejecución de diversas obras de infraestructura vial y ferroviaria utilizando la EHAE. Lo que motivó a que el Departamento Nacional de Vías emitiera especificaciones técnicas para su uso como la DNRE-EM 263/94 [32] y DNRE-EM 264/94 [33].

4.3. Agregado para la fabricación de concreto hidráulico

Diversas investigaciones se han realizado para viabilizar el uso de la EHAE como agregado fino y/o grueso en concreto. Su principal limitación se debe al hecho de que la escoria es inestable volumétricamente, ya que puede sufrir expansión por la reacción de compuestos no deseados como: la conversión de fases del silicato bicálcico, la hidratación y carbonatación de la cal libre, la hidratación del óxido de magnesio libre y la oxidación de Fe^{+2} a Fe^{+3} [34].

Perez [35] propone los siguientes tratamientos a la escoria para brindarle estabilidad volumétrica: envejecimiento en pilas expuestas a la interperie, envejecimiento acelerado por medio de curado al vapor, adición de materiales silíceos e inyección de oxígeno en su proceso de fabricación y la incorporación de arena y oxígeno a la escoria líquida.

Arribas et al. [36] estudiaron la expansión de la EHAE por meteorización y con ensayos acelerados, con el fin de evaluar su aplicación particular como agregado grueso en concreto hidráulico. Los autores concluyen que la expansión de la escoria puede ser controlada durante su producción, que la densidad del concreto se incrementa hasta en un 20% y que la calidad de la interfase matriz-escoria (ITZ) es mejor que la del agregado natural, optimizando el comportamiento mecánico del concreto.

Coppolla et al. [37] evaluaron las propiedades en estado fresco y endurecido de concretos con reemplazo del agregado grueso por EHAE de hasta el 25%. Encontraron que la incorporación de la escoria se traduce en una disminución de la trabajabilidad, igualmente, sucede con la retracción por secado. Concluyen que el uso de este residuo es limitado debido a la mayor densidad del concreto (incremento de la carga muerta) y a la susceptibilidad de fisuras (mayor módulo de elasticidad).

Concretos con la incorporación de EHAE y reforzados con fibra (de acero y sintéticas) para la construcción de pavimentos fueron estudiados por Fuente et al. [38]. Los autores concluyen que la EHAE mejoró la resistencia a la compresión y a la flexión del concreto. Así mismo, determinaron que la incorporación de la escoria no afectó negativamente la capacidad de absorción de energía de ruptura y la resistencia al impacto del concreto, como se observa en la Figura 6.

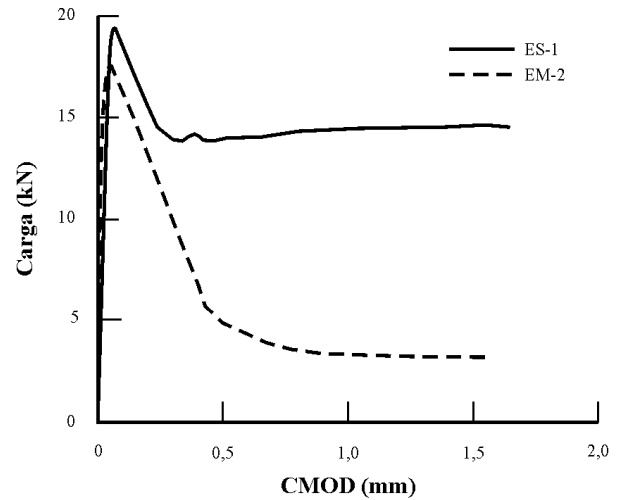


Figura 6. Curva carga a flexión vs deflexión de concretos con escoria que contienen fibra metálica (EM2) y sintética (ES1). Fuente: [38].

Con respecto a la durabilidad, González et al. [39] analizaron concretos fabricados con agregados naturales, así como de mineral de bario y de EHAE. Los resultados indican que el concreto con escoria tiende a presentar una mayor profundidad de penetración de agua bajo presión, una expansión ligeramente superior, una mayor profundidad de carbonatación y una resistencia a la compresión similar a la del concreto de referencia con agregado natural. Debe prestarse atención a la formación de puntos de manchas en la superficie del concreto con escoria sometido a ciclos de humedecimiento y secado.

Queda demostrado el amplio uso de la EHAE en concretos y morteros, un claro ejemplo, son las investigaciones desarrolladas por diferentes autores en concretos especiales como el autocompactante [40], el compactado con rodillo [41-43], el de alta resistencia [44,45] y el pesado antirradiación [46-49].

4.4. Como Agregado para la fabricación de Concreto Asfáltico

Otra línea de investigación interesante es la aplicación de la EHAE en el concreto asfáltico. Paseto y Baldo [50] verificaron el uso de dos tipos de escoria como sustitución del agregado grueso en mezclas asfálticas. Los resultados son satisfactorios cuando se incorporan las escorias, con valores aceptables de estabilidad Marshall y cociente Marshall, sin penalización en términos de densificación y trabajabilidad de las mezclas.

Ameri et al. [51] evaluaron el desempeño de la sustitución de agregado fino y grueso por EHAE en las mezclas en caliente y tibias. Concluyen que el uso de agregado grueso de escoria en la mezcla tibia (WB) mejora la estabilidad Marshall, el módulo resiliente (Figura 7), la resistencia a la tracción, la resistencia al daño por humedad y la resistencia a la deformación permanente de la mezcla. Por lo tanto, se recomienda el uso de agregados de EHAE grueso en la producción de mezclas tibias (WMA).

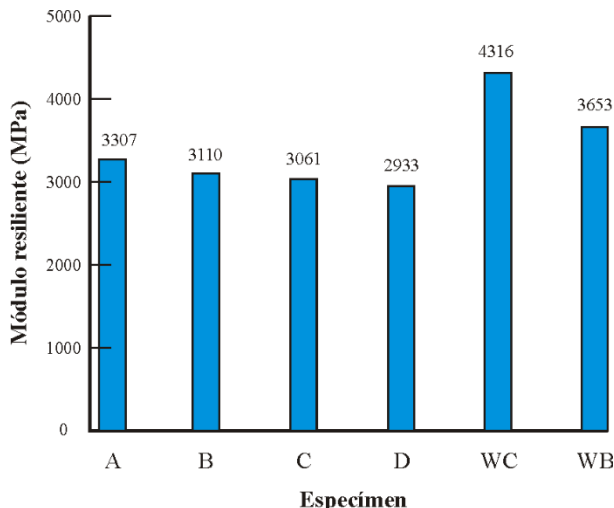


Figura 7. Módulo resiliente de mezclas en caliente (A: agregados de EHAE, B: agregado grueso de EHAE y fino natural, C: agregados naturales y D: agregado fino de EHAE y grueso natural) y tibias (WC: agregados naturales y WB: agregado grueso de EHAE). Fuente: [51].

El comportamiento a la fatiga de las mezclas de asfalto que contienen EHAE en condiciones envejecidas y no envejecidas fue estudiado por Kavussi y Qazizadeh [52]. Concluyen que las mezclas con escoria tienen una mayor resistencia a la fatiga. Este aumento es causado por la alta angularidad de la EHAE, que evita el agrietamiento al aumentar el ángulo de fricción interna de la mezcla y mejorar la trabazón entre partículas. Otra causa, es la mayor adherencia entre el asfalto y la escoria, que reduce la velocidad del agrietamiento y la propagación de grietas. Sin embargo, el efecto en las muestras envejecidas no fue significativo.

5. Caso Colombia

Pocas investigaciones se han desarrollado para implementar este residuo en la construcción de pavimentos en nuestro país. Cabe resaltar el estudio realizado por Serna [53], que analizó alternativas para el aprovechamiento y manejo de la escoria, con el objetivo

de viabilizar económica, ambiental y tecnológicamente su uso en el país. Por medio del análisis multicriterio la autora concluye que la mejor alternativa es la trituración y separación de materiales para posterior comercialización como agregados gruesos y finos.

En la misma línea, Parra y Sanchez [54] estudiaron la valoración de la EHAE como agregado grueso para la producción de concreto. Concluyen que la mezcla que tuvo un mejor comportamiento frente a la resistencia a la compresión, fue aquella que tuvo un reemplazo del 25% de escoria por agregado grueso. Este efecto positivo puede explicarse por la mayor dureza de la EHAE, así como a su mejor adherencia debido a que la superficie es más rugosa y su forma angular.

Cruz et al. [55] analizaron el efecto del reemplazo de agregado fino por EHAE para la fabricación de concreto. Los autores determinaron que a medida que aumenta el contenido de escoria, la resistencia a compresión se incrementa. Sin embargo, la resistencia a la flexión tuvo un comportamiento inversamente proporcional.

Otro tipo de investigación que se encuentra en desarrollo es la de Pérez et al. [56], que estudian el efecto de la incorporación simultánea de vidrio reciclado como agregado fino y EHAE como agregado grueso en concretos para pavimentos rígidos.

También se han ejecutado estudios enfocados en mezclas asfálticas. Marroquín y Quintero [57] evaluaron el uso de la escoria en la fabricación de este tipo de mezclas, concluyendo que la incorporación de EHAE permite mejorar propiedades como estabilidad y flujo Marshall.

Segura [58] evaluó el comportamiento físico y mecánico de mezclas asfálticas con EHAE. La autora concluye que la presencia de escoria mejora la resistencia del concreto asfáltico, así como la deformación por ahuellamiento.

Finalmente, Acosta y Portilla [59] analizaron la inclusión de la EHAE en mezclas asfálticas densas modificadas con asfalto caucho. Determinaron que la mezcla alternativa cumple con los parámetros de diseño y presentó un comportamiento mecánico aceptable, por lo que puede ser una alternativa viable para vías de bajo tránsito.

6. Conclusiones

La industria siderúrgica mundial tiene grandes desafíos ambientales, principalmente, el aprovechamiento de los residuos generados en el proceso de fabricación del acero, como lo es la EHAE. Como se presentó a lo largo del documento existen diversas investigaciones que

evaluaron aplicaciones para la EHAE en la construcción. Sin embargo, deben tenerse en cuenta aspectos importantes para viabilizar el uso seguro de este material:

- La chatarra reciclada como materia prima de la fabricación del acero, posee una elevada variabilidad en su composición. Lo cual que afecta la generación de la EHAE, debido a esto, se hace necesario una caracterización química continua de la escoria.
- Debido a que la EHAE contiene metales pesados es primordial realizar ensayos que determinen la posible lixiviación que puede sufrir a lo largo del tiempo en función del tipo de aplicación.
- Adicionalmente, la EHAE posee compuestos que pueden hidratarse e incrementar el volumen de las partículas. Las industrias siderúrgicas deben ejecutar diferentes procesos para mitigar este efecto.
- Por medio de la revisión del estado del arte se concluye que el uso de la EHAE puede ser una alternativa viable como material de construcción. Cabe resaltar que su mayor potencial es como agregado para la producción de capas granulares, concretos, morteros y mezclas asfálticas, debido a los efectos positivos que conlleva como consecuencia de sus elevadas propiedades mecánicas.
- Sin embargo, es imperante que en Colombia se promuevan investigaciones y estudios interlaboratoriales que permitan el uso seguro y confiable de este subproducto siderúrgico a través de la creación de normas y especificaciones de construcción para las condiciones particulares de nuestro país.

Referencias

- [1] World Steel Association, “World steel in figures 2019”, [En línea]. Disponible en: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:96d7a585-e6b2-4d63-b943-4cd9ab621a91/World%2520Steel%2520in%2520Figures%25202019.pdf>
- [2] World Steel Association, “Steel statistical yearbook 2018”, [En línea]. Disponible en: https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:e5a8eda5-4b46-4892-856b-00908b5ab492/SSY_2018.pdf
- [3] M. S. Mamlouk, J. P. Zaniewski, *Materiales para ingeniería civil*. Pearson Educación, S. A., Madrid, 2009.
- [4] C. Thomas, J. Rosales, J. A. Polanco, F. Agrela, “7 - Steel slags”, *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*, pp. 169-190, 2019, doi: 10.1016/B978-0-08-102480-5.00007-5
- [5] M. A. González, “Comportamiento y diseño de hormigones estructurales con áridos siderúrgicos EAF”, tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.
- [6] “Slag and its relation to the corrosion characteristics of ferrous metals”, National Slag Association Report NSA 172-13, [En línea]. Disponible en: http://www.nationalslag.org/sites/nationalslag/files/documents/nsa_172-13_slag_and_corrosion.pdf
- [7] M. Öner, K. Erdoğan, A. Günlü, “Effect of components fineness on strength of blast furnace slag cement”, *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 4, pp. 463-469, 2003, doi:10.1016/S0008-8846(02)00713-5
- [8] B. Lothenbach, K. Scrivener, R. Hooton, “Supplementary cementitious materials”, *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 12, pp. 1244-1256, 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.12.001
- [9] V. Kocaba, E. Gallucci, K. Scrivener, “Methods for determination of degree of reaction of slag in blended cement pastes”, *Cement and Concrete Research*, vol. 42, no. 3, pp. 511-525, 2012, doi: 10.1016/j.cemconres.2011.11.010
- [10] H. Yoon, J. Seo, S. Kim, H. Lee, S. Park, “Characterization of blast furnace slag-blended Portland cement for immobilization of Co”, *Cement and Concrete Research*, vol. 134, pp. 106089, 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106089
- [11] R. Taylor, I. Richardson, R. Brydson, “Composition and microstructure of 20-year-old ordinary Portland cement-ground granulated blast-furnace slag blends containing 0 to 100% slag”, *Cement and Concrete Research*, vol. 40, no. 7, pp. 971-983, 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.02.012
- [12] S. Suntharalingam, Y. Takahashi, “Experimental study on autogenous shrinkage behaviors of different Portland blast furnace slag cements”, *Construction and Building Materials*, vol. 230, pp. 116980, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116980

- [13] R. Patra, B. Mukharjee, “Influence of incorporation of granulated blast furnace slag as replacement of fine aggregate on properties of concrete”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 165, pp. 468-476, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.125
- [14] M. Skaf, J. Manso, A. Aragón, J. Fuente-Alonso, V. Ortega-López, “EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use”, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 120, pp. 176-185, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2016.12.009
- [15] M. Senani, N. Ferhoune, A. Guettala, J. Aguiar, “Eco-concrete with incorporation of blast furnace slag as natural aggregates replacement”, *Science and Technology of Materials*, vol. 30, no. 3, pp. 144-150, 2018, doi: 10.1016/j.stmat.2017.12.001
- [16] L. Nicula, O. Corbu, M. Iliescu, “Influence of Blast Furnace Slag on the Durability Characteristic of Road Concrete Such as Freeze-Thaw Resistance”, *Procedia Manufacturing*, vol. 46, pp. 194-201, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.03.029
- [17] O. Oren, A. Gholampour, O. Gencil, T. Ozbakkaloglu, “Physical and mechanical properties of foam concretes containing granulated blast furnace slag as fine aggregate”, *Construction and Building Materials*, vol. 238, pp. 117774, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117774
- [18] C. Srinivasarao, S. V. Bhaskar Reddy, “Study of standard grade concrete consisting of granulated blast furnace slag as a fine aggregate”, *Materials Today: Proceedings*, vol. 27, no. 2, pp. 859-865, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.024
- [19] I. N. Grubeša, I. Barišić, A. Fucic, S. S. Bansode, “2 - Ferrous slag: Characteristics and properties”, *Characteristics and Uses of Steel Slag in Building Construction*, pp. 15-30, 2016, doi: 10.1016/B978-0-08-100368-8.00002-6
- [20] “User guidelines for byproducts and secondary use materials in pavement construction”. Steel slag, FHWA-RD-97-148, [En línea]. Disponible en: <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/ssal.cfm>
- [21] L. Rohde, W. Peres, J. A. Pereira, “Electric arc furnace steel slag: base material for low-volume roads”, vol. 1819, no. 21, pp. 201-207, 2003, doi: 10.3141/1819b-26
- [22] F. Maghool, A. Arulrajah, C. Suksiripattanapong, S. Horpibulsuk, A. Mohajerani, “Geotechnical properties of steel slag aggregates: Shear strength and stiffness”, *Soil and Foundations*, vol. 59, no. 5, pp. 1591-1601, 2019, doi: 10.1016/j.sandf.2019.03.016
- [23] National Minerals Information Center, “Iron and Steel Statistics and Information”, [En línea]. Disponible en: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_&_steel/
- [24] Worldsteel Association, “Steel Industry Co-Products”, [En línea]. Disponible en: https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:2941f748-b906-4952-8b11-03ffee835b39/Co-products_position_paper_vfinal.pdf
- [25] L. Muhmood, S. Vitta, D. Venkateswaran, “Cementitious and pozzolanic behavior of electric arc furnace steel slags”, *Cement and Concrete Research*, vol. 39, no. 2, pp. 102-109, 2009, doi: 10.1016/j.cemconres.2008.11.002
- [26] P. E. Tsakiridis, G. D. Papadimitriou, S. Tsivilis, C. Koroneos, “Utilization of steel slag for Portland cement clinker production”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 152, no. 2, pp. 805-811, 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.07.093
- [27] H. Kim, K. Kim, S. S. Jung, J. I. Hwang, J. Choi, I. Sohn, “Valorization of electric arc furnace primary steelmaking slags for cement applications”, *Waste Management*, vol. 41, pp. 85-93, 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2015.03.019
- [28] L. M. Serrato “Utilización de escoria de horno de arco eléctrico en morteros a base cemento Portland”, tesis de maestría, Universidad Autónoma De Nuevo León, 2014.
- [29] K. Otegi, “Estudio del impacto ambiental por lixiviación de la escoria de acería en capas granulares no ligadas 706-TFM-314”, tesis de maestría, Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.
- [30] H. Motz, J. Geiseler, “Products of steel slags an opportunity to save natural resources”, *Waste Management*, vol. 21, no. 3, pp. 285-293, 2001, doi: 10.1016/S0956-053X(00)00102-1
- [31] A. E. A. E. Behiry, “Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as subbase material in flexible pavement”, *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 43-53, 2013, doi: 10.1016/j.asej.2012.07.006

- [32] Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, “Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários”, DNER-PRO 262/94.
- [33] Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, “Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários”, DNER-PRO 263/94.
- [34] M. Mansó. “Fabricación de hormigón hidráulico con escorias de horno de arco eléctrico”, tesis de maestría, Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Burgos, 2001.
- [35] Y. Perez, “Estudio de durabilidad del hormigón con áridos siderúrgicos de horno de arco eléctrico”, trabajo final de grado, Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.
- [36] I. Arribas, A. Santamaría, E. Ruiz, V. Ortega, J. M. Manso, “Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete”, *Construction and Building Materials*, vol. 90, pp. 68-79, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.003
- [37] L. Coppola, A. Buoso, D. Coffetti, P. Kara, S. Lorenzi, “Electric arc furnace granulated slag for sustainable concrete”, *Construction and Building Materials*, vol. 123, pp. 115-119, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.142
- [38] J. A. Fuente, V. Ortega, M. Skaf, A. Aragón, J. T. San-José, “Performance of fiber-reinforced EAF slag concrete for use in pavements”, *Construction and Building Materials*, vol. 149, pp. 629-638, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.174
- [39] M. A. González, S.H.P. Cavalaro, G. Rodríguez, A. Aguado, “Durability of concrete with electric arc furnace slag aggregate”, *Construction and Building Materials*, vol. 217, pp. 543-556, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.082
- [40] A. Santamaría, A. Orbe, M. M. Losañez, M. Skaf, V. Ortega-Lopez, J. J. González, “Self-compacting concrete incorporating electric arc-furnace steelmaking slag as aggregate”, *Materials & Design*, vol. 115, pp. 179-193, 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2016.11.048
- [41] M. N. Lam, S. Jaritngam, D. Le, “Roller-compacted concrete pavement made of Electric Arc Furnace slag aggregate: Mix design and mechanical properties”, *Construction and Building Materials*, vol. 154, pp. 482-495, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.240
- [42] M. N. Lam, S. Jaritngam, D. Le, “Compressive strength and durability properties of roller-compacted concrete pavement containing electric arc furnace slag aggregate and fly ash”, *Construction and Building Materials*, vol. 191, pp. 912-922, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.080
- [43] H. Rooholamini, R. Sedghi, B. Ghobadipour, M. Adresi, “Effect of electric arc furnace steel slag on the mechanical and fracture properties of roller-compacted concrete”, *Construction and Building Materials*, vol. 211, pp. 88-98, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.223
- [44] F. Faleschini, M. A. Fernández, M. A. Zanini, K. Brunelli, C. Pellegrino, E. Hernández, “High performance concrete with electric arc furnace slag as aggregate: Mechanical and durability properties”, *Construction and Building Materials*, vol 101, no. 1, pp. 113-121, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.022
- [45] F. Faleschini, M. A. Zanini, K. Brunelli, C. Pellegrino, E. Hernández, “Use of electric arc furnace slag for high strength concrete production”, *Applied Mechanics and Materials*, vol. 847, pp. 537-543, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.847.537
- [46] M. Maslehuddin, A. Naqvi, M. Ibrahim, Z. Kalakada, “Radiation shielding properties of concrete with electric arc furnace slag aggregates and steel shots”. *Annals of Nuclear Energy*, vol. 53, pp.192-196, 2013, doi: 10.1016/j.anucene.2012.09.006
- [47] M. Papachristoforou, I. Papayianni, “Radiation shielding and mechanical properties of steel fiber reinforced concrete (SFRC) produced with EAF slag aggregates”, *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 149, pp. 26-32, 2018, doi: 10.1016/j.radphyschem.2018.03.010
- [48] B. Pomaro, F. Gramegna, R. Cherubini, V. De Nadal, V. Salomoni, F. Faleschini, “Gamma-ray shielding properties of heavyweight concrete with Electric Arc Furnace slag as aggregate: An experimental and numerical study”, *Construction and Building Materials*, vol. 200, pp. 188-197, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.098
- [49] A. Beaucour, P. Pliya, F. Faleschini, R. Njinwoua, C. Pellegrino, A. Noumowé, “Influence of elevated temperature on properties of radiation shielding concrete with electric arc furnace slag as coarse aggregate”, *Construction and Building Materials*, vol. 256, pp. 119385, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119385

- [50] M. Pasetto, N. Baldo, “Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 181, no. 1-3, pp. 938-948, 2010, doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.05.104
- [51] M. Ameri, S. Hesami, H. Goli, “Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag”, *Construction and Building Materials*, vol. 49, pp. 611-617, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.034
- [52] A. Kavussi, M. J. Qazizadeh, “Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging”, *Construction and Building Materials*, vol. 72, pp. 158-166, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.052
- [53] A. M. Serna, “Selección de tecnologías apropiadas para el aprovechamiento de la escoria en el sector siderúrgico”, trabajo de grado, Universidad Tecnológica De Pereira, 2012.
- [54] L. M. Parra, D. P. Sanchez, “Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica Diaco”, trabajo de grado, Universidad de la Salle, 2010.
- [55] R. A. Cruz, D. M. Franco, L. Pérez, “Reemplazo del agregado fino por escoria de horno de cubilote para la fabricación de concreto”, *Revista INGE CUC*, vol. 10, no. 1, pp. 83-88, 2014.
- [56] Y. Pérez, E. Vera, “Preparation of concrete mixtures with electric arc furnace slag and recycled ground glass”, *IOP Conf. Series: Journal of Physics*, vol. 935, pp. 012010, 2017, doi: 10.1088/1742-6596/935/1/012010
- [57] J. A. Marroquín, D. L. Quintero, “Comparar las propiedades mecánicas de un asfalto modificado con escoria de acero con las propiedades de un asfalto tradicional”, trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia, 2016.
- [58] A. T. Segura, “Estudio del comportamiento físico y mecánico de mezclas asfálticas; con materiales reutilizables en la construcción como escoria de acero”, trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia, 2016.
- [59] A. Barreto, J. Portilla, “Evaluación del comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica densa con sustitución de agregados gruesos por residuos de escoria y asfalto caucho”, trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia, 2019.