



LA FORMACIÓN DE INGENIEROS:  
UN COMPROMISO PARA EL  
DESARROLLO Y LA SOSTENIBILIDAD

15 al 18  
DE SEPTIEMBRE

20  
20

[www.acofi.edu.co/eiei2020](http://www.acofi.edu.co/eiei2020)

# USO DE LA ESCORIA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO (EHAE) COMO AGREGADO FINO PARA LA PRODUCCIÓN DE MORTERO ESTRUCTURAL

**Nicolás Mayor Hernandez, José  
Armando Valderrama Sánchez,  
Manuel Alejandro Rojas Manzano,  
Héctor Mauricio Benavides García**

**Pontificia Universidad Javeriana  
Cali, Colombia**

**Daniel Prado**

**Siderúrgica Del Occidente S.A. SIDOC  
Cali, Colombia**

## Resumen

El crecimiento de la población mundial ha provocado un mayor consumo de recursos, en este escenario toma importancia la construcción, por la necesidad de más viviendas, ampliación de la infraestructura vial, la generación de comercio e industria y demás. El acero es uno de los materiales más utilizados para estos fines, el cual durante su elaboración genera diferentes residuos según la materia prima utilizada. Cuando se produce de la fundición de chatarra, se genera la escoria de horno de arco de horno eléctrico (EHAE) o negra, posteriormente, en el proceso de afinado, en el horno tipo cuchara, resulta la escoria blanca. Cabe aclarar que por cada tonelada de acero fabricado resultan entre 110-150 Kg de EHAE, este residuo actualmente es almacenado por la industria y es necesario realizar investigaciones que permitan su utilización de forma segura para evitar efectos negativos al medio ambiente. Debido a lo anterior, este trabajo tiene como objetivo evaluar el uso de la escoria como agregado fino para la fabricación de morteros estructurales. Se desarrolló una metodología experimental que incluye la revisión del estado del arte del uso del agregado siderúrgico, la caracterización de todos los materiales (cemento, agregado natural de río y agregado siderúrgico), el diseño de mezcla para una resistencia a la compresión de 35 MPa, la fabricación de morteros estructurales de referencia y con agregado siderúrgico, así como la determinación de sus propiedades en estado fresco y endurecido (resistencia a la compresión y a la flexión). Finalmente, los resultados muestran que el uso del agregado siderúrgico fino producido con EHAE incrementó las propiedades mecánicas del mortero, este comportamiento puede estar asociado a la elevada resistencia al desgaste del material y a su superficie rugosa que mejora la adherencia. Se concluye que el uso de la escoria puede ser una alternativa técnicamente viable como reemplazo del agregado natural para la fabricación de morteros y concretos, teniendo un

efecto positivo en la sostenibilidad de la industria de la construcción, pues disminuirá la explotación de recursos naturales no renovables.

**Palabras clave:** escoria de horno de arco eléctrico; morteros; agregado siderúrgico

### **Abstract**

*The growth of the world's population has led to greater consumption of resources, in this scenario takes importance construction, due to the need for more housing, expansion of road infrastructure, generation of trade and industry and so on. Steel is one of the most used materials for these purposes, which during its production generates different wastes according to the raw material used. When it's produced from scrap smelting, electric furnace slag (EHAE) or black is generated, then, in the tuning process, in the spoon furnace, white slag is produced. It should be clarified that for every ton of steel manufactured there are between 110-150 kg of EHAE, this waste is currently stored by industry and it's necessary to carry out research that allows its use safely to avoid negative effects on the environment. Because of the above, this work aims to evaluate the use of slag as a fine aggregate for the manufacture of structural mortars. An experimental methodology was developed that includes the review of the state of the art of the use of the steel aggregate, the characterization of all materials (cement, natural river aggregate and steel aggregate), the mixture design for a compression resistance of 35 MPa, the manufacture of structural mortars of reference and with steel aggregate, as well as the determination of its properties in a fresh and hardened state (resistance to compression and bending). Finally, the results show that the use of the fine steel aggregate produced with EHAE increased the mechanical properties of the mortar, this behavior may be associated with the high wear resistance of the material and its rough surface that improves adhesion. It's concluded that the use of slag can be a technically viable alternative as a replacement for natural aggregate for the manufacture of mortars and concretes, having a positive effect on the sustainability of the construction industry, as the exploitation of non-renewable natural resources will decrease.*

**Keywords:** electric arc furnace slag; mortars; steel aggregate

## **1. Introducción**

La industria de la construcción está en continuo crecimiento a causa del aumento de la población mundial. Lo anterior, trae como desafío el desarrollo sostenible que busca disminuir el impacto ambiental generado 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. Dada importancia de esta temática diferentes estrategias están siendo implementadas, donde se destaca la búsqueda de la economía circular en los materiales y materias primas de la construcción, adoptando acciones como la utilización de residuos de diferentes industrias y la incorporación de nuevas tecnologías para reducir el consumo energético y emisiones. En este escenario, el acero toma relevancia al ser uno de los materiales más utilizados en el mundo.

Para la fabricación del acero se distinguen principalmente dos procesos, el primero se basa en la extracción y explotación de recursos naturales como el mineral de hierro. Según cifras de la World Steel Association (2018), este proceso representa un 74% de la producción mundial. Para el restante, se utiliza la tecnología de reciclaje de chatarra metálica, donde el acero se funde por medio de un horno eléctrico. 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.

La escoria es un residuo de inevitable generación cuando se fabrica el acero. De modo general existen dos tipos según su proceso de producción: las escorias de hierro (extracción de recursos naturales - mineral de hierro) y las escorias de acero (de material de reciclaje o chatarra). Estas últimas se clasifican en: Escoria de Horno de Arco Eléctrico (EHAE) o negra, la cual es producida en la etapa de fundición de la chatarra; Escoria de Horno de Cuchara (EHC) o blanca, producida en la etapa de afinado; y Escoria de Horno Básico de Oxígeno (EHBO).

Pocos estudios se encontraron sobre el uso de la EHAE como agregado fino y/o grueso en la fabricación de concreto o de mortero. Su principal limitación se debe al hecho de que la escoria es inestable volumétricamente, pues puede sufrir expansión por la reacción de compuestos no deseados. Sin embargo, se ha demostrado que mejora propiedades mecánicas, como la resistencia a la flexión y a la compresión (Ortega, 2017; Parra y Sánchez, 2010; Coppola, et al., 2016). Cabe aclarar, que puede disminuir la trabajabilidad de las mezclas. Así mismo, (Serna, 2012), por medio del análisis multicriterio, concluye que la mejor alternativa para el aprovechamiento de la EHAE es la trituración para posterior comercialización de agregados gruesos y finos. Debido a la falta de investigaciones en el medio técnico sobre la viabilidad del uso de agregado siderúrgico (EHAE) como reemplazo del agregado fino en materiales a base de cemento, se desarrolló este proyecto que busca promover la economía circular de la industria siderúrgica.

## 2. Programa Experimental

### 2.1 Materiales

#### 2.1.1 Agregados finos

Son materiales sólidos e inertes, con un tamaño menor al tamiz N°4 (4.75mm). Se usaron dos tipos de agregados finos: uno natural proveniente del río Cauca, y el siderúrgico producido de la trituración y clasificación de la EHAE de la empresa SIDOC S.A. A continuación, se describen los ensayos de caracterización para encontrar las propiedades físicas de los agregados y verificar su cumplimiento con la normativa para el uso en concretos y morteros (NTC 174).

- Granulometría (NTC 77; ASTM C 136-92).

Este ensayo se realiza para separar y clasificar los diferentes tamaños de partículas encontrados en una muestra significativa del material. En la Figura 1 se muestra la curva granulométrica del agregado siderúrgico y del natural.

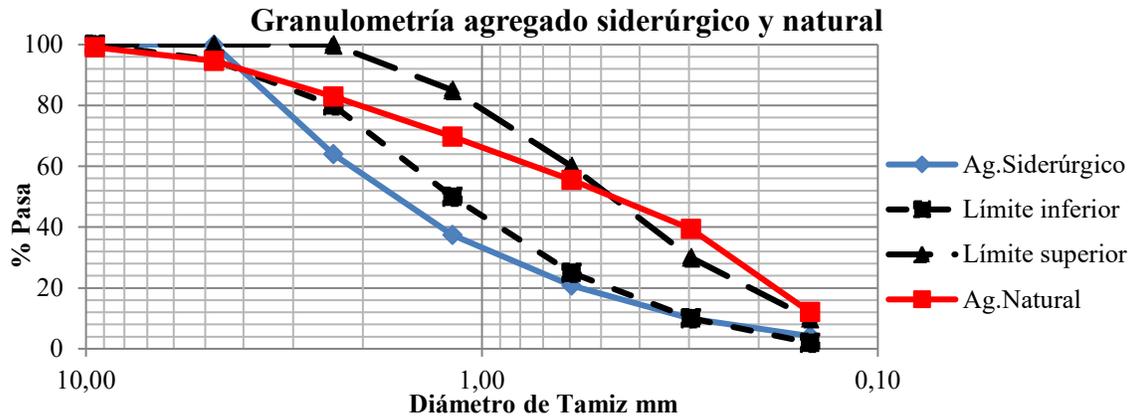


Figura 1 Granulometría del agregado siderúrgico y natural

Se observa cómo el agregado siderúrgico tiene una gradación gruesa y no encaja con los límites establecidos por la norma NTC 174 para agregados finos. Sin embargo, esto no necesariamente hace inviable la utilización del agregado siderúrgico. En cambio, la distribución granulométrica de la arena natural utilizada cumple en su gran mayoría con la especificación técnica.

- Masa unitaria o densidad bulk (NTC 92; ASTM C 29).

Este ensayo permite conocer la masa por unidad de volumen de los agregados estudiados tanto en su estado suelto como compacto. Este parámetro es importante para elaborar la dosificación de mezclas de concretos y morteros.

- Impurezas orgánicas (NTC 127; ASTM C 40).

El objetivo de este ensayo es determinar el contenido de materia orgánica presente en el material. Ambos agregados cumplieron con las especificaciones de la norma NTC 174, ya que no están por encima del valor 3 de la escala de colores.

- Gravedad Específica y Absorción (NTC 237; ASTM C 128-93).

Con esta metodología se pretende determinar propiedades físicas de los agregados, siendo que el agregado siderúrgico presenta valores superiores al natural, tanto de gravedad específica como de absorción.

En la Tabla 1 se presenta un resumen con los principales parámetros encontrados de la caracterización de los agregados finos.

Tabla 1 Caracterización de agregados finos

Propiedad	Unidad	Agregado natural	Agregado siderúrgico
Módulo de Finura (MF)		2.47	3.64
Tamaño Máximo Nominal (TMN)		4.75 mm (N°4)	4.75 mm (N°4)
Tamaño Máximo (TM)		9.5 mm (3/8")	9.5 mm (3/8")
Materia Orgánica		2	1
Masa unitaria seca compacta	Kg/l	1.7	2.09
Masa unitaria seca suelta	Kg/l	1.51	1.91
Gravedad específica SSS		2.81	3.81
Absorción	%	1.84	3.84

En la figura 2 se muestran diversas imágenes de algunos de los ensayos realizados para la caracterización de los agregados finos.

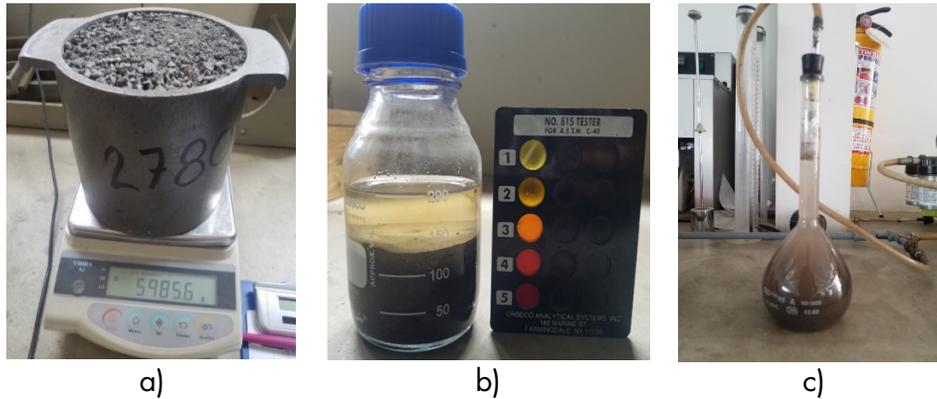


Figura 2 Caracterización del agregado siderúrgico: a) masa unitaria, b) materia orgánica y c) peso específico

### 2.1.2 Cemento (NTC 121).

El cemento utilizado es hidráulico de alta resistencia temprana (ART) fabricado por una empresa de la región.

- Consistencia normal (NTC 110; ASTM C 187-86).

En este ensayo se obtiene la cantidad de agua que se debe añadir al cemento para que la sonda del aparato de Vicat penetre 10 milímetros la mezcla. Para encontrar la consistencia adecuada y determinar el tiempo de fraguado. La cantidad de agua para conseguir la consistencia normal fue de 182.27g.

- Tiempo de fraguado (NTC 118; ASTM C191).

Esta metodología tiene como objetivo determinar los tiempos de fraguado inicial y final de una pasta de consistencia normal fabricada con cemento ART. El tiempo de fraguado inicial del cemento ART está dentro de lo exigido por la norma NTC 121, ya que no es menor a 45 minutos ni mayor a 420 minutos.

- Finura del cemento hidráulico (NTC 294; ASTM C430).

Se realizó el ensayo de finura como parte de los requerimientos de la norma técnica colombiana para cementos hidráulicos. Este es importante ya que a menor tamaño de partícula la velocidad de hidratación del cemento se incrementa.

- Peso específico del cemento (NTC 221; ASTM C188).

Este ensayo es importante para la dosificación de mezclas de concreto y morteros, aunque no es un parámetro de aceptación o rechazo del material.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de los resultados de caracterización del cemento.

Tabla 2 Caracterización del cemento ART

		Unidad	Cemento ART
<b>Consistencia normal (Relación a/c)</b>			0.28
<b>Tiempo de fraguado</b>	<b>Inicial</b>	Minutos	100
	<b>Final</b>	Minutos	130
<b>Finura</b>		cm <sup>2</sup> /g	3829.6
<b>Peso específico</b>		g/cm <sup>3</sup>	3.08

## 2.2 Dosificación y Mezclas

Con los datos de la caracterización de los materiales, la siguiente etapa consistía en la dosificación del mortero, que buscaba atender los siguientes parámetros:

- Resistencia de dosificación a los 7 días: 35 MPa.
- Consistencia de la mezcla: fluida.

El método utilizado fue el desarrollado por Sánchez de Guzmán (2001), especificado para agregado fino de origen natural. Para alcanzar la consistencia especificada fue necesario usar aditivo plastificante. Debido a que el objetivo del proyecto era incorporar el agregado siderúrgico, se determinó evaluar el reemplazo total de la arena. Como la densidad del agregado siderúrgico es mayor que la del agregado natural, por lo tanto, este reemplazo se realizó en volumen. En la Tabla 3 se observa las proporciones de las mezclas.

Para evaluar el efecto de la incorporación del agregado siderúrgico en las propiedades mecánicas del mortero, se prepararon un total de once (11) mezclas, siendo cuatro (4) con agregado natural y siete (7) con EHAE.

Tabla 3 Proporción de las mezclas

		Agua	Cemento	Agregado fino	$\Sigma$
<b>Agregado natural</b>	Masa (Kg/cm <sup>3</sup> )	342.6	658.8	1246.4	2252.4
	Tecnológica	0.520	1.000	1.892	
<b>Agregado siderúrgico</b>	Masa (Kg/cm <sup>3</sup> )	301.6	580.0	1943.3	2827.8
	Tecnológica	0.520	1.000	3.350	

## 2.3 Métodos

Para el análisis de la viabilidad del agregado siderúrgico en la fabricación de morteros, se estudiaron las propiedades en estado fresco y endurecido de las mezclas.

### 2.3.1 Estado fresco

Es el periodo de tiempo en el cual el mortero aún se comporta como un fluido.

- Fluidez de morteros de cemento hidráulico (NTC 111; ASTM C230).

Determina la consistencia en que se encuentra la mezcla realizada con la mesa de flujo y puede asociarse a la trabajabilidad del mortero.

### 2.3.2 Estado endurecido

Este periodo es después de que la mezcla fragüe.

- Resistencia a la compresión de cubos de mortero (NTC 220; ASTM C109)

Consiste en la elaboración de tres (3) cubos de mortero con dimensiones de 50x50x50mm y determinar su resistencia a los siete (7) días después del periodo de curado. Debido a que el cemento utilizado fue ART, esta fue la edad escogida para la comparación entre los morteros con agregado natural y siderúrgico.

- Resistencia a la flexión de viguetas (NTC 120; ASTM C348)

Consiste en la elaboración de dos (2) viguetas de mortero con un tamaño de 40x40x160mm, para luego someterlas a un ensayo de flexión a 3 puntos, ejerciendo la carga en el centro del elemento. Cabe indicar, que este ensayo fue realizado únicamente en los morteros con agregado siderúrgico y se evaluaron las siguientes edades: 7, 28 y 56 días.

- Resistencia a la compresión con las mitades de las viguetas (UNE 80-101-88)

Después de la ejecución del ensayo a flexión de las viguetas con agregado siderúrgico, cada una de las mitades fue ensayada a compresión por medio del uso de platinas de 40x40mm. Se respetaron las edades de ensayo.

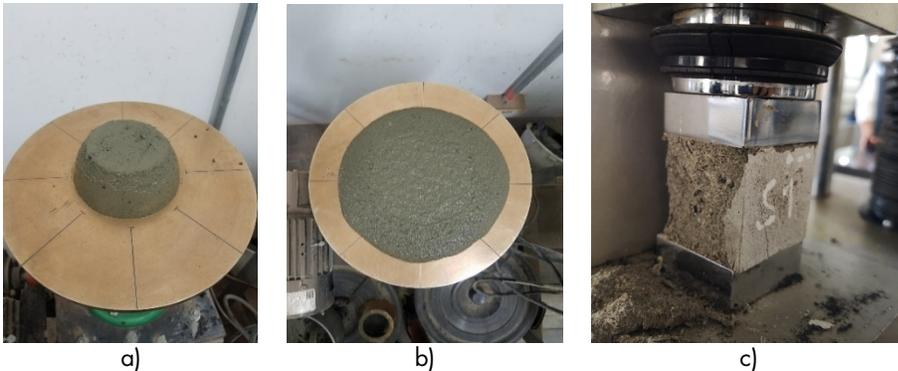


Figura 3 Pruebas en estado fresco y endurecido: a) fluidez antes de los golpes, b) fluidez después de los golpes, c) resistencia a la compresión y d) resistencia a la flexión.

### 3. Resultados

#### 3.1 Estado Fresco

El estado fresco se evaluó mediante el ensayo de fluidez en morteros de cemento hidráulico con la mesa de flujo, se hicieron diversas pruebas para encontrar la consistencia deseada, agregando y variando el aditivo superplastificante de 0 a 1% en el caso de los morteros con agregado natural, encontrando valores de fluidez desde 35 hasta 100. Y para el caso del agregado siderúrgico se varió el aditivo de 0 a 0.5% encontrando valores de fluidez de 50 a 100. Esto demuestra que la incorporación de la EHA incrementó la trabajabilidad de la mezcla, lo cual puede conllevar a beneficios en costos y para obtener mejores propiedades mecánicas.

#### 3.2 Estado Endurecido

En la Tabla 4 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas de los morteros elaborados y su respectiva desviación estándar.

Tabla 4 Propiedades Mecánicas de los Morteros

<b>Ensayo a la Compresión en Cubos</b>		
<b>Mortero</b>	<b>Resistencia (MPa)</b>	<b>Desviación (MPa)</b>
Ag. Siderúrgico	41.06	3.64
Ag. Natural	35.43	3.01
<b>Ensayo a la Flexión en Viguetas (con agregado siderúrgico)</b>		
	<b>Resistencia (MPa)</b>	<b>Desviación (MPa)</b>

7 días	28 días	56 días	7 días	28 días	56 días
6.46	6.36	8.12	0.74	0.79	1.12
<b>Ensayo a la Compresión en Viguetas (con agregado siderúrgico)</b>					
<b>Resistencia a compresión (MPa)</b>			<b>Desviación (MPa)</b>		
7 días	28 días	56 días	7 días	28 días	56 días
42.64	47.66	56.06	5.00	6.19	5.37

En la figura 4 se muestra la comparación de la resistencia a la compresión de los morteros con agregados natural y siderúrgico.

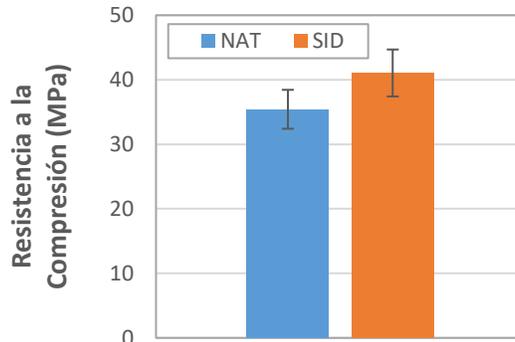


Figura 4 Resistencia promedio de los morteros a 7 días (NAT: agregado natural, SID: agregado siderúrgico)

Se evidencia que la incorporación de EHA incrementó la resistencia en un 15,9%, este comportamiento se puede explicar debido a la textura rugosa del agregado siderúrgico, a su elevada dureza y densidad.

En la figura 5 se presenta la evolución en el tiempo de la resistencia a compresión y flexión de los morteros con agregado siderúrgico.

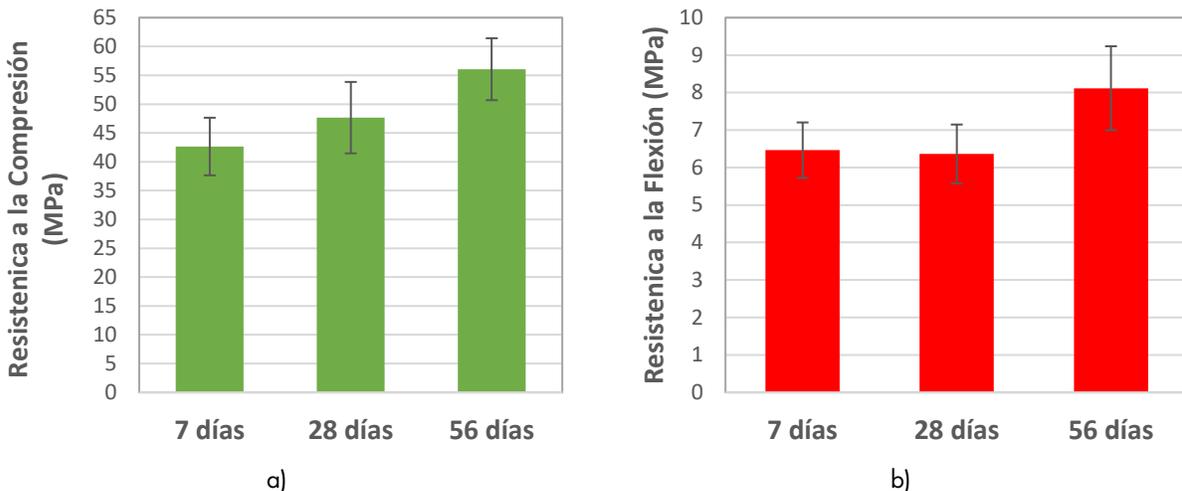


Figura 5 Resultados de las propiedades mecánicas de morteros con agregado siderúrgico: a) resistencia a la compresión y b) resistencia a la flexión.

Aunque el cemento utilizado fue ART, se observa que las propiedades mecánicas de los morteros con agregados siderúrgicos aumentan con el tiempo y sobrepasan el valor de la resistencia de dosificación.

#### 4. Conclusiones

Aunque el agregado siderúrgico fino no cumple con la especificación granulométrica, sus demás propiedades físicas demuestran que puede ser utilizado para la fabricación de morteros y concretos.

Los morteros con diferentes agregados cumplieron con la resistencia de dosificación, sin embargo, cuando se incorpora la EHA hubo un incremento del 15,9% de la resistencia a la compresión. Este comportamiento se puede explicar por las elevadas propiedades físicas del agregado siderúrgico (textura superficial, dureza y densidad). Adicionalmente, los morteros con agregado siderúrgico mostraron un incremento de las propiedades mecánicas (compresión y flexión) en el tiempo. Se concluye que es viable sustituir la utilización del agregado siderúrgico en la fabricación de morteros estructurales. Más investigaciones sobre la evaluación de otras propiedades (microestructura, durabilidad expansión y contracción) serán necesarias para poder utilizar este material de forma segura.

#### 5. Referencias bibliográficas

- World Steel Association. (2018). Steel Statistical Yearbook. Consultado el 22 de mayo de 20120 en [https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:e5a8eda5-4b46-4892-856b-00908b5ab492/SSY\\_2018.pdf](https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:e5a8eda5-4b46-4892-856b-00908b5ab492/SSY_2018.pdf)
- L. Coppola, A. Buoso, D. Coffetti, P. Kara, S. Lorenzi. (2016). Electric arc furnace granulated slag for sustainable concrete. *Construction and Building Materials*, Vol.123, pp. 115-119.
- J. A. Fuente, V. Ortega, M. Skaf, A. Aragón, J. T. San-José. (2017). Performance of fiber-reinforced EAF slag concrete for use in pavements. *Construction and Building Materials*, Vol: 149, pp. 629-638.
- M. Serna. (2012). Selección de tecnologías apropiadas para el aprovechamiento de la escoria en el sector siderúrgico. Trabajo de grado para optar al título de Especialista, Universidad Tecnológica De Pereira.
- L. M. Parra, D. P. Sánchez. (2010). 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. Municipio Tuta, Boyacá.

#### Sobre los autores

- **Nicolás Mayor Hernández:** Estudiante de ingeniería civil. nicolasmh98@javerianacali.edu.co
- **José Armando Valderrama Sánchez:** Estudiante de ingeniería civil. jose23@javerianacali.edu.co
- **Manuel Alejandro Rojas Manzano:** Ingeniero Civil, Especialista en Administración de Empresas de la Construcción, Magister en Estructuras, Doctor en Construcción. Profesor Asistente. alejandro.rojas@javerianacali.edu.co

- **Héctor Mauricio Benavides García:** Ingeniero Civil, Magíster en Ingeniería Civil. Profesor Instructor. [hector.benavides@javerianacali.edu.co](mailto:hector.benavides@javerianacali.edu.co)
- **Daniel Prado:** Ingeniero Mecánico, Especialista en Eficiencia Energética. [daniel.prado@sidocsa.com](mailto:daniel.prado@sidocsa.com)

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2020 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)