

Revista INGE CUC, Vol. 10, N° 1, pp 83-88, Junio, 2014

Reemplazo del Agregado Fino por Escoria de Horno de Cubilote para la Fabricación de Concreto*

Replacing Fine Aggregate for Cupola Furnace Slag in Concrete

Artículo de Investigación Científica - Fecha de Recepción: 27 de marzo de 2014 - Fecha de Aceptación: 13 de mayo de 2014

Ricardo Alfredo Cruz HernándezDoctor en Ciencias Técnicas. Ingeniero civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (Colombia).
racruz@uis.edu.co**Diana Marcela Franco Durán**

Ingeniera civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (Colombia). dianita_franco8@hotmail.com

Ludwing Pérez Bustos

Magíster en Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (Colombia). jupebu26@hotmail.com

Para citar este artículo / To reference this article:

R. A. Cruz Hernández, D. M. Franco Durán, and L. Pérez Bustos, "Reemplazo del Agregado Fino por Escoria de Horno de Cubilote para la Fabricación de Concreto," *INGE CUC*, vol. 10, no. 1, pp. 83–88, 2014.

Resumen: Este trabajo presenta las propiedades físico-mecánicas obtenidas de un concreto fabricado con escoria de horno de cubilote (EHC), la cual se utilizó como sustituto del agregado fino (arena) en diferentes proporciones: 0, 10, 15 y 20 %. La evaluación de la granulometría, densidad, absorción, humedad natural y contenido de material férreo de la EHC permitió caracterizarla como arena gruesa bien gradada, con poca cantidad de finos. Para una resistencia de diseño de 14 MPa del concreto modificado (CM) se realizaron ensayos de resistencia a la compresión, módulo de rotura, absorción, módulo de elasticidad y densidad de material endurecido. Los resultados obtenidos evidencian un comportamiento favorable del CM en su resistencia a compresión, al sustituir el 20 % de arena por escoria. Asimismo, se encontró que la densidad mantiene una relación proporcional con el porcentaje de sustitución y el valor de su masa unitaria se encuentra dentro del rango de valores aceptable para un concreto de peso normal.

Palabras clave: Agregado Fino, Concreto, Escoria, Horno de Cubilote, Propiedades Mecánicas.

Abstract: This study presents the physical-mechanical properties of concrete made with crushed cupola furnace slag (CFS). The sand (fine aggregate) was replaced for CFS in different proportions: 0, 10, 15 and 20%. Granulometry, density, absorption, natural moisture and iron content evaluation showed CFS as well-graded sand with the right thickness and little quantity of fine grains. The modified concrete (MC) design strength was 14 MP. For each percentage of substitution, tests such as compressive strength, modulus of rupture, absorption, tensile strength, modulus of elasticity, and hardened material density were carried out. As a result, 20 % slag MC showed a favorable behavior in compressive strength. Likewise, density is proportional to the substitution percentage and its unit mass value is within the range of acceptable values for a normal concrete weight.

Keywords: Fine aggregate, Concrete, Slag, Cupola Furnace, Mechanical Properties.

* Artículo de Investigación Científica derivado del proyecto 5561: "Uso de la escoria de procesos metalúrgicos como agregado del concreto para la fabricación de elementos de construcción no estructurales", de la Universidad Industrial de Santander. Fecha de inicio: 13 de agosto de 2012 - Fecha de finalización: 13 de noviembre de 2014.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una tendencia a la construcción sustentable, también conocida como “construcción verde”, la cual utiliza materiales producidos con bajo consumo de energía. Este hecho ha conllevado al uso de materia prima proveniente de residuos o sub-productos de fábricas industriales, como sustituto de los componentes del concreto [1].

La industria del sector metalúrgico produce anualmente grandes cantidades de desechos sólidos que representan una problemática empresarial para la región. Entre estos residuos se encuentra la escoria, un material fundido, formado por las reacciones químicas entre la materia prima, los materiales añadidos al horno y las impurezas oxidadas que se presentan durante el refinado del metal. La necesidad de eliminar este tipo de residuos genera no solo gastos de transporte, transformación, almacenaje y disposición final, sino que además a largo plazo producirá un impacto en el medio ambiente por degradación ambiental [2].

La escoria es uno de los materiales comúnmente utilizados como reemplazo del material cementante y del agregado fino en proporciones del 5, 10 y 15 % [3]. Las escorias más utilizadas en el campo de la construcción derivan de la fabricación de hierro y acero, destacándose la escoria de alto horno (EAH) y la escoria de horno eléctrico (EHE), las cuales una vez trituradas a una granulometría apropiada presentan propiedades técnicas adecuadas para su uso como árido [4]- [5].

La mayoría de los estudios realizados se han enfocado principalmente en la sustitución parcial del cemento portland por EAH, por ser este el elemento más contaminante o que presenta un mayor gasto energético en la fabricación del concreto. En términos generales, los resultados de estas investigaciones han permitido obtener ciertos beneficios en el concreto, como: baja permeabilidad, mejor durabilidad, incremento en la resistencia ante la reacción álcali-sílice y reducción considerable en los costos del material [6]-[7]. Específicamente, la EAH mejora el desempeño en la resistencia a compresión del concreto [8] y la EHE permite obtener un mayor esfuerzo a compresión (cuando este es dosificado con una relación agua/cemento media de 0,47 - 0,52), y el esfuerzo a tensión junto con el módulo de elasticidad presentan valores similares a los de un concreto tradicional [9].

El avance respecto a la caracterización de las escorias mencionadas anteriormente ha sido significativo para el sector de la construcción, lo cual ha permitido que autores como Miyazawa et al. [10] propongan el uso del cemento con contenido de escoria de alto horno en estructuras de concreto, incluyendo edificios de concreto reforzado. Sin embargo, escorias provenientes de otros hornos, pertenecientes a la industria de la fundición de hierro, como la escoria de horno de cubilote EHC, no ha sido estudiada con la misma intensidad.

Este artículo presenta los resultados de la caracterización física de la EHC y de las propiedades físico-mecánicas de un concreto que ha sido modificado (CM) con EHC triturada, diseñado para una resistencia máxima a compresión de 14 MPa, con porcentajes de sustitución de arena (agregado fino) por EHC de 0, 10, 15 y 20 %; siendo 0 % el porcentaje para un concreto sin escoria, denominado “concreto de control” (CC), a diferencia del estudio realizado por [15], en el cual se estudió el comportamiento de un CM con 30 % de sustitución del agregado fino por EHC triturada y con sustituciones del agregado grueso por EHC granulada del orden de 50, 70 y 100 %.

II. METODOLOGÍA

A. Agregados

La EHC es una masa de aspecto vidriosa, relativamente inerte, con una estructura química compleja. Es un material no metálico formado por sílice, carbono y otras bases producto de la fusión del hierro en el horno de cubilote. Este horno, también llamado “cúpula”, se utiliza para la fundición de chatarra de acero, productos de hierro fundido y aleaciones de hierro. Su principal fuente de energía es el carbón de coque, y puede producir alrededor de 100 toneladas de hierro fundido por hora [11].

La caracterización de la EHC se realizó a partir de ensayos de granulometría, densidad, absorción, humedad natural, entre otros. Para establecer las características granulométricas de los agregados se determinó su módulo de finura, según la Norma Técnica Colombiana NTC 77. La caracterización química de la escoria se desarrolló mediante el método de análisis de Energía Dispersiva Espectroscópica de Rayos X (EDX).

La EHC se trituró en la Máquina de los Ángeles para reducir el tamaño de sus partículas. El fraccionamiento tuvo una duración total de 30 minutos, con dos intervalos de 15 minutos. Durante la selección de la escoria se utilizó el procedimiento por cuarteo, descrito en la NTC 1522, y su tamizado se realizó según la NTC 77. Se encontraron las proporciones para cada tamaño de partículas y se determinó el módulo de finura del material triturado de acuerdo con los porcentajes establecidos en la NTC 174. Para establecer la granulometría de la EHC como agregado fino se utilizó el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS). La densidad y absorción de la escoria se determinó a partir de la NTC 237 y su porcentaje de humedad natural se calculó según la norma INVE - 122.

El contenido férrico presente en la escoria –producto de la molienda realizada en la Máquina de los Ángeles– se determinó con el propósito de retirar las partículas gruesas que posiblemente podrían afectar los ensayos de granulometría. Para tal fin se realizó la extracción manual de las partículas de hierro en 500 gramos de escoria usando un imán convencional.

Una vez separado el material magnéticamente, este se pesó en una balanza digital.

B. Diseño de la Mezcla

El diseño de la mezcla del CM se realizó a partir del procedimiento descrito por el Instituto Americano del Concreto, en el comité 211 [12]. Las características del cemento empleado Tipo I se presentan en la tabla I.

TABLA I. CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO TIPO I

Trióxido de Azufre	3,5 %
Oxido de Magnesio	6 %
Tiempo Fraguado Inicial	45 Minutos
Expansión en Agua	0,02 %
Resistencia 28 días	26 Mpa

Fuente: Autores.

Las diferentes mezclas de concreto utilizadas se obtuvieron sustituyendo el agregado fino –arena– por EHC en porcentajes de 0, 10, 15 y 20 %.

De acuerdo con las características de los materiales que componen el concreto, la manejabilidad requerida y la metodología de diseño de la mezcla, se determinó una relación agua cemento (a/c) de 0.68 para todas las sustituciones de escoria por arena. Esta relación a/c relativamente alta se requiere para evitar la adición de plastificantes. Para obtener un concreto con una consistencia semiseca se seleccionó un asentamiento de 4 cm y un contenido de aire 2.5 % de acuerdo con el tamaño del agregado grueso y el grado de exposición de la mezcla. La dosificación utilizada para el diseño de la mezcla se presenta en la tabla II.

TABLA II. DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA

MATERIAL	VOLUMEN NETO [m3]	PESO [Kg]
Cemento	0,098	292,7
Agregado fino	0,32	752,89
Agregado grueso	0,357	931,91
Agua	0,2	200
Aire	0,025	0

Fuente: Autores.

C. Proceso Experimental

Las propiedades del concreto modificado con EHC fueron evaluadas a partir de diferentes ensayos, que permitieron determinar su módulo de rotura, resis-

tencia a la compresión, absorción, carga de rotura, módulo de elasticidad, densidad y masa unitaria. Las probetas ensayadas se fabricaron y curaron por inmersión durante 7, 14, 28 y 60 días, de acuerdo con la NTC 1377.

El ensayo de módulo de rotura se realizó con el equipo de pruebas MTS 647 Hydraulic Wedge Grip. Para esta prueba se fabricaron especímenes prismáticos de dimensiones 5 x 5 x 20 cm, curados durante un periodo de 28 días, sumergidos en agua. Se aplicó una carga uniforme de 0.007 KN/s, registrándose 1015 datos para cada espécimen. El valor del módulo de rotura se obtuvo a partir de (1):

$$MR = \frac{3PL}{2bd^2} \tag{1}$$

Donde MR es el módulo de rotura, P es la carga máxima aplicada, L es la longitud libre entre apoyos, b y d son el ancho y la altura promedio de la muestra, respectivamente.

El ensayo a compresión se desarrolló según la NTC 673 y se utilizó el equipo de laboratorio MTS 647 Hydraulic Wedge Grip. Para cada porcentaje de sustitución de arena por escoria se fabricaron probetas cilíndricas con diámetro de 10 cm y altura de 20 cm.

La absorción del CM se determinó según la NTC 4992. El proceso de secado de las probetas se realizó en un horno ventilado a una temperatura de 110 °C, durante un periodo de 24 horas, hasta obtener una masa seca constante (Ms). Finalizado este proceso, las probetas se pesaron cada dos horas de manera consecutiva hasta obtener una variación de masa inferior al 0.2 %. Transcurrido el tiempo de saturación se calculó la masa absorbida (Ma) y la masa húmeda (Mh). La absorción de agua (Aa) se calculó a partir de (2) y (3), con una variación en los resultados del 0,1 %.

$$Aa, \left[\frac{Kg}{m^3}\right] = \left(\frac{Mh - Ms}{Mh - Ma}\right) * 1000 \tag{2}$$

$$Aa \% = \left(\frac{Mh - Ms}{Ms}\right) * 100 \tag{3}$$

El módulo de elasticidad del concreto se determinó según la NTC 4025, a partir de (4). Los ensayos se realizaron sobre cilindros de concreto de 15 cm de diámetro y 30 cm de longitud, de acuerdo con la NTC 1377. Los especímenes se ensayaron con 28 días de curado por inmersión en agua, y la toma de datos de carga se registró para incrementos de carga de 20 KN.

$$Ec = \left(\frac{s2 - s1}{s2 - 0.00005}\right) \tag{4}$$

De (4), Ec es el módulo de elasticidad (Mpa), S2 el esfuerzo correspondiente al 40% de la carga ultima (Mpa), S1 es el esfuerzo de la deformación longitudinal $\epsilon 1$ de las 50 millonésimas y $\epsilon 2$ es la deformación longitudinal producida por el esfuerzo S2.

Para estimar la densidad del material endurecido, las probetas se secaron en un horno con extractor de humedad, manteniendo una temperatura constante de 100 °C durante 24 horas. La masa seca (Ms) se obtuvo mediante dos pesajes sucesivos a intervalos de 2 horas, con una variación de masa menor a 0,2 %. Las probetas se dejaron sumergidas en agua durante un periodo de 24 horas, a una temperatura constante de 20 °C, manteniendo constante la altura de agua por encima de las probetas (50 mm). La densidad del material y la masa unitaria del concreto en estado fresco se determinaron a partir de (5) y (6), respectivamente.

$$Densidad D, \left[\frac{Kg}{m^3} \right] = \left(\frac{Ms}{Mh - Ma} \right) * 1000 \quad (5)$$

$$D = \left(\frac{Mc - Mm}{Vm} \right) \quad (6)$$

Donde D es la masa unitaria del concreto, Mc la masa del recipiente lleno con concreto, Mm la masa del recipiente y Vm corresponde al volumen del recipiente.

III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A partir de la caracterización granulométrica realizada, la EHC se puede clasificar como arena tipo SW, arena bien gradada con pocos finos, cuya presencia no produce cambios apreciables en las características de resistencia de la fracción gruesa, según las características granulométricas evaluadas ($Cu > 4, 3 > Cc > 1$). La distribución granulométrica de la EHC triturada se presenta en la tabla III.

La NTC 174 establece como requisito de granulometría para el agregado fino rangos aceptables para los porcentajes que pasan por cada tamiz. Los porcentajes que no cumplen con estas exigencias corresponden al tamiz N° 8, 16 y 30, ya que el agregado no debe contener más del 50 % del material retenido en 2 tamices consecutivos.

TABLA III. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA ESCORIA

Tamiz	Peso retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa	% Pasa NTC 174
4	49,80	4,98	4,98	95,02	100
8	221,60	22,17	27,15	72,85	95 – 100
16	369,80	37,00	64,15	35,85	80 – 100
30	152,50	15,26	79,41	20,59	50 – 85
50	27,30	2,73	82,14	17,86	25 – 60
100	107,10	10,72	92,86	7,14	10 – 30
FONDO	67,50	6,75		0,39	2 – 10

Fuente: Autores.

Las propiedades de la EHC se presentan en la tabla IV. Su módulo de finura permite clasificarla

como arena gruesa. El valor de su densidad aparente se encuentra dentro del rango de aceptación para agregados finos (2.3 gr/cm³ - 3.6 gr/cm³). Aunque su densidad natural es baja, esta no afecta el diseño de la mezcla por saturación de poros. Algunos de los valores obtenidos en la caracterización de la EHC difieren de los obtenidos por [13], estudio en el que se obtuvo una humedad natural de 0,54 y un módulo de finura de 2,073.

TABLA IV. PROPIEDADES DE LA EHC

Módulo de Finura	3,507
Densidad aparente [gr/cm3]	2,35
Densidad nominal [gr/cm3]	2,40
% Absorción	0,85
Humedad Natural	0,33

Fuente: Autores.

Los elementos que principalmente componen la EHC son el sílice y el calcio, tal como se observa en la Fig. 1. El alto contenido de sílice en forma de agregado podría causar un efecto de arenas expansivas al estar en contacto con el agua [13].

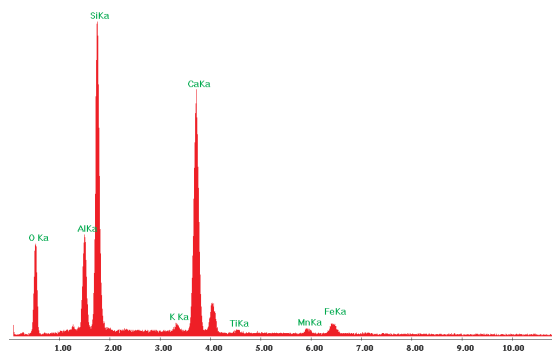


Fig. 1. Espectro de rayos x, método de EDX

Fuente: Autores.

El contenido de hierro promedio presente en la EHC corresponde a aproximadamente el 3.55 %. Al comparar este valor con el contenido de residuos de aluminio presente en la escoria, el cual varía entre el 30 - 60 %, este resulta ser bajo [14].

La resistencia a flexión a los 28 días de curado disminuye al aumentar la cantidad de escoria en el concreto (ver Fig. 2). Esta disminución en la resistencia se debe al bajo contenido de partículas finas de escoria que puedan aportar propiedades cementantes. Los ensayos presentaron una desviación estándar de 0.135 y un porcentaje de confianza del 95 %. El valor del módulo de rotura alcanzó un valor máximo de 4,06 MPa en el concreto de control (CC), valor que resulta alto para el concreto patrón. Igualmente, los valores obtenidos para los demás porcentajes del CM presentan módulos de rotura aceptables.

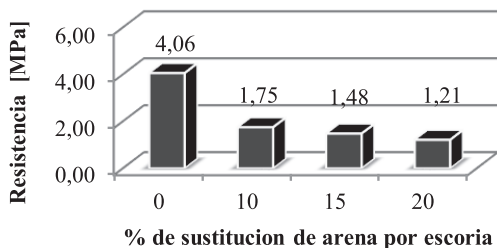


Fig. 2. Valores del módulo de rotura para cada % de sustitución
Fuente: Autores.

En la Fig. 3 se muestra el comportamiento de la resistencia a compresión del CM a lo largo de los 60 días de curado. Los resultados presentaron un coeficiente de variación del 3.2 % y un rango de aceptación de resistencia de cilindros (100 mm x 200 mm) para 12 muestras de 9 %, según la NTC 673. Durante los 7 y 14 días, el CM con sustituciones del 10 y 15 % disminuyen su resistencia, mientras que el CC y el concreto con sustitución del 20 % aumentan su resistencia progresivamente con el tiempo. Las probetas no alcanzaron la resistencia de diseño de 14 MPa, posiblemente por las características del cemento utilizado. La probeta con un 20 % de sustitución de escoria por arena alcanzó una resistencia a compresión máxima de 13.69 MPa a los 60 días de curado. Esta resistencia supera en un 16.98 % la resistencia del CC y representa el 99.3 % de la resistencia de diseño. Al comparar estos resultados con los obtenidos por [13] a los 28 días de curado y para una misma relación de a/c, la tendencia creciente obtenida es similar. Para ambos casos la mayor resistencia a compresión se obtuvo para un porcentaje de sustitución del 20 %. Esto se debe a que mayores sustituciones de EHC por agregado fino se adicionan mayores porcentajes de fino, que aportan propiedades cementantes, aumentando la resistencia del CM.

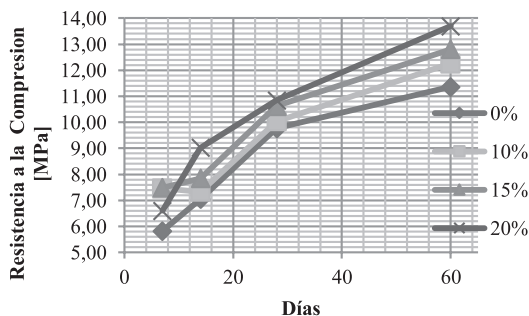


Fig. 3. Resistencia a compresión para diferentes edades del curado
Fuente: Autores.

La NTC 4992 especifica que las losetas de concreto deben tener una absorción de agua total (Aa %) para todo el volumen del espécimen no superior al 7 %, como valor promedio para todos los especímenes de la muestra [16]. El valor mínimo obtenido en los ensayos de absorción del CM fue del 10.2 % para una

sustitución del 10 % de arena por EHC. Este porcentaje supera el valor aceptable propuesto en la NTC 4992 (ver tabla V). Esta misma tendencia se presenta para otros valores de sustitución de EHC por agregado [15]. Estos valores altos de absorción pueden limitar el uso del CM para la fabricación de elementos de construcción.

TABLA V. ABSORCIÓN DEL CM PARA DIFERENTES % DE SUSTITUCIÓN

Porcentaje de Sustitución Arena por Escoria [%]	Absorción [%]
0	10,6
10	10,2
15	10,4
20	10,3

Fuente: Autores.

La tabla VI muestra los valores del módulo de elasticidad obtenidos experimentalmente a partir de (4). La variación de los módulos para los diferentes concretos es mínima y se corresponde con la resistencia a compresión.

$$E_c = 3900 \sqrt{f^c} \quad (7)$$

TABLA VI. VALORES DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

Tiempo [Días]	% de Sustitución	Ecuación Experimental [MPa]
28	0	6289
28	10	5462
28	15	6372
28	20	5934

Fuente: Autores.

A medida que se incrementa el grado de sustitución de EHC por arena aumenta la densidad del CM. En la tabla VII se observa una diferencia de 4.49 kg/m³ entre el CC y el CM con sustitución del 20 %.

TABLA VII. DENSIDAD EN ESTADO ENDURECIDO PARA DIFERENTES % DE SUSTITUCIÓN

Porcentaje de Sustitución Arena por Escoria [%]	Densidad del material endurecido [Kg/m ³]
0	2058,65
10	2061,52
15	2062,03
20	2063,15

Fuente: Autores.

Los valores de masa unitaria para cada una de las probetas estudiadas se presentan en la tabla VIII. Estos valores permiten clasificar al CM como un concreto normal (masa unitaria entre 2000 - 2500 kg/m³).

TABLA VIII. MASA UNITARIA PARA DIFERENTES % DE SUSTITUCIÓN

Porcentaje de Sustitución Arena por Escoria [%]	Masa Unitaria [Kg/m³]
0	2307,46
10	2303,59
15	2308,93
20	2304,95

Fuente: Autores.

IV. CONCLUSIONES

El cemento es un material que combinado con otros materiales en las proporciones correctas se convierte en un material clave para la construcción. Aunque estos materiales se encuentran con facilidad en diferentes países, la materia prima de la región ofrece la oportunidad de utilizar residuos industriales como la EHC como agregado del concreto [1].

La clasificación granulométrica realizada permitió caracterizar a la escoria como arena gruesa bien gradada con pocos finos. Aunque la humedad natural y la absorción de agua arrojaron valores bajos, estos no afectaron el diseño de la mezcla.

Aunque la cantidad de datos registrados durante el ensayo del módulo de rotura fue significativa (1015 datos), la tendencia decreciente que se observa en los resultados obtenidos no refleja el comportamiento esperado. Estos resultados presentan una contradicción respecto a los resultados obtenidos de resistencia de compresión.

La resistencia a compresión aumenta con el tiempo para todos los concretos evaluados. La resistencia de diseño a los 28 días (14 MPa) no se alcanzó en ninguna de las probetas ensayadas. La relación *a/c* obtenida en el diseño de la mezcla (0,68), de acuerdo con las características de los materiales utilizados, resulta ser alta; esta proporción pudo perjudicar la resistencia mecánica del material.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Industrial de Santander y a la empresa LAVCO S.A. por su contribución en el financiamiento del proyecto.

REFERENCIAS

[1] M. S. Imbabi, C. Carrigan, and S. McKenna, "Trends and developments in green cement and concrete technology", *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 1, pp. 194-216, 2012.

[2] H. Qasrawi, "The use of Steel slag aggregate to enhance the mechanical properties of recycled aggregate and retain the environment", *Construction and Building Materials*, vol. 54, pp. 298-304, 2014.

[3] S. T. Ramesh, R. Gandhimathi, P. V. Nideesh, S. Rajahumar, and S. Prateepkumar, "Use of furnace slag and welding slag as replacement for sand in concrete", *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 4, n° 3, 2013. Disponible en: <http://www.journal-ijeee.com/content/4/1/3>

[4] L. Amaral de Lima, "Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: Propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental", tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 1999.

[5] H. Qasrawi, F. Shalabi, and I. Asi, "Use of low CaO unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate", *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 1118-1125, 2009. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061808001748>

[6] L. Hadjsadok, Kenai, F. Courard, J. Michel, and Kha-tib, "Durability of mortar and concretes containing slag with low hydraulic activity", *Cement & Concrete Composites*, n° 34, pp. 671-677, 2012. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946512000388>

[7] G. J. Osborne, "Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete", *Cement and Concrete Composites*, n° 21, pp. 11-21, 1999. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946598000328>

[8] S. Thanga Ramesh, R. Gandhimathi, P. Veetil Nidheesh, S. Rajakumar, and Subramani Prateepkumar, "Use of furnace slag and welding slag as replacement for sand in concrete", *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 4, n°3, 2013. Disponible en: <http://www.journal-ijeee.com/content/4/1/3>

[9] M. Etxeberria, C. Pacheco, J. M. Meneses, and I. Berri-di, "Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates", *Construction and Building Materials*, n° 24, pp. 1594-1600, 2010. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810000772>

[10] S. Miyazawa, T. Yokomuro, E. Sakai, A. Yatagai, N. Nito, and Kiyoshi Koibuchi, "Properties of concrete using high C3S cement with ground granulated blast-furnace slag", *Construction and Building Materials*, vol. 61, pp. 90-96, 2014.

[11] E. Larsen, "Intelligent Control of Cupola Melting. Austral Asia- pacific forum on intelligent processing and manufacturing of materials", Sidney, Australia, Lockheed Martin Idaho Technologies Company, Jan. 1997.

[12] ACI COMMITTEE 211, "Recommended Practice for Selecting Proportions for Normal Weight Concrete", Farmington Hills, Michigan, American Concrete Institute, 1998.

[13] C. M. Pico Cortés, "Propuesta de concreto con agregado fino de escoria de cubilote como aporte al estudio de la durabilidad y propiedades acústicas", 2012. [Recurso electrónico]. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2012/144400.pdf>

[14] R. López, P.A. Nicola, O. A. Manfredi y C. F. Pérez, "Procesamiento de escorias de aluminio experimentación a escala piloto", en Simposio Materia 2003. Jornadas SAM conamet: Universidad Tecnológica Nacional, Departamento de Metalurgia, Córdoba, Argentina, 2003. Disponible en: <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/bariloche/Trabajos/A01/0103.PDF>

[15] R.A. Cruz, L. Pérez, D. Acosta y K. Castillo, "Propiedades del concreto con sustitución de escoria de horno de cubilote como agregado fino y escoria granulada", *Revista Colombiana de Materiales*, n° 5, pp. 291-296, 2014.

[16] Norma Técnica Colombiana - NTC 4992, Losetas de concreto para pavimentos. Sección 3, p. 20, 2004.