

EVALUACIÓN DE ESCORIA DE ACERÍA DE HORNO DE ARCO EN HORMIGONES DE 20.0 MPa

Ing. Alexander Fernández Pérez
Profesor Auxiliar del Departamento de Construcciones
Universidad de Holguín
Sede: Oscar Lucero Moya, Cuba,
afernandez@uho.edu.cu

Dra. C. Libys Marta Zúñiga Igarza
Profesora Titular del Departamento de Construcciones
Universidad de Holguín
Sede: Oscar Lucero Moya, Cuba
lmzi@uho.edu.cu

Especialista. María Onelia Urbina Reynaldo
Profesora Auxiliar del Departamento de Construcciones
Universidad de Holguín
Sede: Oscar Lucero Moya, Cuba
maria_urbino@uho.edu.cu

Resumen.

Respondiendo a la necesidad del desarrollo de materiales de construcción alternativos y compatibles con la protección del medio ambiente, se realiza la caracterización físico mecánicas para posteriormente evaluar las posibilidades de utilizar el residuo siderúrgico, generado durante la fabricación del acero, en la planta ACINOX de la provincia de Las Tunas, como material de construcción, en sustitución del árido fino convencional para fabricar hormigones masivos con resistencia de 20.0 MPa. Se evaluaron dosificaciones tanto con áridos siderúrgicos como con áridos naturales, determinando solo emplear la dosificación con el 20% de escoria como sustituto de la arena. Basado en el método de Vitervo O'Reilly, se proponen tres dosificaciones de hormigón con diferentes proporciones entre áridos finos y gruesos, las cuales obtuvieron en el análisis a compresión resultados satisfactorios, demostrando el buen comportamiento de este residuo como material de construcción.

Palabras Claves: Residuos industriales, hornos de arco eléctrico, escorias de acería, árido artificial cribado, hormigón.

INTRODUCCIÓN

Es conocido a nivel mundial que la actividad constructiva constituye una de las ramas de la economía más consumidora de recursos naturales, siendo los áridos uno de los más utilizados. Estos son catalogados como no renovables y su demanda supera los volúmenes extraídos, surgiendo entonces la necesidad de cambiar los patrones de producción y consumo vigentes hasta este momento, por lo que muchos investigadores se han dado a la tarea de buscar materiales alternativos, no solo en la naturaleza sino en los propios residuos obtenidos en la producción industrial.

Dentro de los residuos generados a nivel industrial se encuentran las escorias metalúrgicas, las que clasifican como residuos sólidos. En esta investigación se realiza un análisis de las escorias siderúrgicas resultantes del proceso de producción del acero en la fábrica ACINOX de las Tunas, y a partir de los resultados obtenidos utilizar este material como árido fino en dosificaciones de hormigón hidráulico, que sea sostenible y estructural, con las mismas prestaciones en estado fresco y endurecido que los hormigones tradicionales, existiendo la posibilidad de fabricar hormigón pesado.

El proceso de elaboración del acero en la planta de acero inoxidable (ACINOX) de Las Tunas es a partir del Horno de Arco Eléctrico (HAE); por lo tanto el residuo a estudiar es denominado “escoria de acería de horno de arco eléctrico” (Amaral, 2000).

Esta industria genera diariamente cincuenta toneladas de escoria, que se vierten en lugares de depósitos a caballero. Según los planes de producción, la acumulación de material residual alcanzará valores de 19 000 toneladas de escorias por año.

El uso de escoria siderúrgica en lugar de piedras naturales, no sólo ahorra la energía que puede ser necesaria para extraer áridos naturales, sino que también elimina los impactos negativos asociados con la minería, tales como efectos sobre la biodiversidad o el paisaje.

Directivas para el manejo y tratamiento de los residuos industriales

La Sociedad Pública de Gestión Ambiental IHOBE, S.A, hace referencia a la aplicación de una estrategia de producción limpia en las acerías que potencie la reducción de la generación de residuos y aproveche al máximo las materias primas empleadas.

En el caso de las escorias, la principal medida para su tratamiento es la valorización de las mismas, como material de construcción una vez realizado estudios previos de viabilidad técnica y medioambiental.

Ventajas del reciclado de las escorias

Según informes de las comunidades autónomas de España, es posible absorber el 100% del total de escorias de acería generada, independientemente del tipo de alternativa de reciclado empleada. (IHOBE, S.A.), destacan las principales ventajas que presenta el reciclaje de las escorias de acería como materia prima secundaria:

- Reduce el consumo de recursos naturales en las explotaciones de canteras de calizas naturales y da origen a subproductos, que pueden ser utilizados como material de construcción.
- Optimiza el espacio en vertederos destinados para la deposición de los sólidos inertes.
- Activa una dinámica de pensamiento que favorece nuevas actitudes ambientales, orientadas a la producción limpia en el sector de la fabricación de acero.

Consideraciones medioambientales

Existen criterios técnico-medioambientales de calidad, establecidos por el CITMA y aplicados por la empresa siderúrgica, para el manejo de las escorias de acería producidas por la fábrica, tanto en condiciones de producción como en su disposición final en el relleno sanitario, que aseguran su viabilidad como materia prima para otros procesos en construcción civil. (Divo 2015)

Fabricación del acero en hornos de arco eléctrico y de cuchara. Generación de escorias

El proceso de fabricación del acero empleando el HAE se divide en dos etapas fundamentales. En la primera denominada (fusión), se generan las escorias negras; en la segunda (afino del baño fundido) se conciben las blancas.

Estudio de los áridos y escoria de acería

La composición química de las escorias negras y blancas procedente del conjunto de hornos de la empresa, fue determinada en el laboratorio de ensayos en la propia fábrica. (Tabla.1).

Se aprecia la existencia mayoritaria de óxidos básicos -Cal Viva (CaO) y el Dióxido de Silicio (SiO₂)- , tanto en las escorias negras como blancas.

El Hierro (Fe) predomina en la muestra de escorias negras, por los restos de metal que pueden quedar mezclados con las escoria, al ser fundidos por los electrodos del arco eléctrico; mientras que en la composición de las blancas abunda la alúmina (Al₂O₃).

Tabla 1 a) Análisis de una muestra de escoria negra del horno de arco eléctrico.

Minerales	NiO	C _{r2} O ₃	MnO	Fe	CaO	MgO	SiO ₂	AL ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Zn	IB
% en la Muestra	<0.01	1,2	6,3	17,4	34	4,6	16	3,1	<0.001	0,01	0,002	2,13

Tabla 1 b) Análisis de una muestra de escoria blanca del horno de cuchara.

Minerales	NiO	C _{r2} O ₃	MnO	Fe	CaO	MgO	SiO ₂	AL ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Zn	IB
% en la muestra	0,034	<0.1	1	1,3	43	9,6	22	16,2	0,034	0,03	0,02	1,95

IB: índice de basicidad, relación entre el CaO y el SiO₂ presente en la composición química de la muestra.

Análisis de peligrosidad

En nuestro país no existen normas para verificar el grado de contaminación o los efectos negativos que pueden desencadenar las escorias, al ser empleadas como material de construcción. Según la Instrucción Española (EHE; 1999)

cuando no se tengan antecedentes sobre la naturaleza de los áridos disponibles, o se vayan a emplear para otras aplicaciones distintas de las sancionadas por la práctica, se realizarán ensayos de identificación mediante análisis mineralógicos, petrográficos, y físicos.

Estas razones propician el empleo de Códigos Europeos para el tratamiento de residuos, mencionándose dos ensayos estándares para las escorias de acería:

- Lixiviación, eco toxicidad y concentración de metales pesados
- Estabilidad de volumen.

Áridos

Los áridos –calizos triturados y naturales- , empleados en la dosificación de los hormigones patrones, proceden de la cantera El 200 mil, perteneciente al municipio de Gibara

El árido artificial de escoria se obtiene en el relleno sanitario destinado para este fin, ubicado a 800 m de la empresa siderúrgica, considerando lo especificado en la NC-671:2008 para el tratamiento de áridos almacenados en pilas:

Se escogen puntos aleatorios del depósito, tomando seis muestras en sacos multicapas de nylon grueso, las cuales tienen un peso total de 120 kg, todos los materiales se trasladan a los laboratorios de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA), en el municipio Holguín.

RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS A LOS ÁRIDOS Y LAS ESCORIAS.

Tanto al árido alternativo de escorias siderúrgicas como a los áridos naturales se le realizaron los siguientes ensayos, se realizan ensayos para tres muestras de escorias

- Análisis granulométrico

Tabla 2. Análisis granulométrico para 3 muestras aleatorias de escoria.

Tamiz (mm)	Muestra 1 % Pasado	Muestra 2 % Pasado	Muestra 3 % Pasado
9.52	100	100	100
4.76	100	100	100
2.38	55	63	40
1.19	32	39	22
0.59	21	26	16
0.295	16	19	13
0.149	12	15	11

Tabla 3. Resumen de análisis estadístico al ensayo granulométrico a las 3 muestras combinadas de escorias.

Tamices Normados (mm)	% Pasado
9.52	100
4.76	99
2.38	54
1.19	35
0.59	24
0.295	18
0.149	15

Tabla 4. Análisis granulométrico al árido fino de la cantera El 200 Mil

Tamices Normados (mm)	% Pasado
$\frac{3}{8}$	100
4	98
8	68
16	43
30	22

50	10
100	4

Tabla 5. Análisis granulométrico al árido fino de la cantera El 200 Mil

Tamices Normados (mm)	% Pasado
38.1	100
25.4	98
12.7	53
4.76	10
2.38	2

Como se puede apreciar en la Tabla. 2. El comportamiento de la escoria negra proveniente de la fábrica ACINOX de Las Tunas presenta una granulometría continua, aunque los tamices #100, #16 y #8 no cumplen con los parámetros establecidos por la NC-251:2013 como áridos finos en hormigones hidráulicos. Teniendo en cuenta que este residuo proviene de un depósito y no de un molino, con el fin de obtener árido para hormigones, el resultado es aceptable.

En este caso el comportamiento de la arena procedente de El 200 Mil como se aprecia en la Tabla 4, está ligeramente por debajo del límite inferior establecido por la NC-251:2013, para áridos finos en hormigones hidráulicos, específicamente en los tamices #30, #16 y #8, se pudo determinar que se debe a desperfectos en el sistema de molienda de la cantera.

El análisis granulométrico se realiza bajo la norma NC-178:2002 para áridos gruesos de fracción 25-5 mm, proveniente de la cantera El 200 Mil, el comportamiento de su granulometría, cumple con lo establecido por la NC-251:2013 para fracciones de 25-5mm.

- Cálculo del módulo de finura.

El módulo de finura de la combinación de las muestras de escoria es 3.54 y coincide dentro del rango establecido por la NC-251:2013 para árido fino (2.2-3.58).

El módulo de finura del árido fino es de 3.52 lo que cumple con la NC-251:2013.

- Determinación del material más fino que el tamiz de 0,074 mm (No. 200)

El resultado del ensayo del tamiz No.200 para las escorias siderúrgicas es de 3.53% y según la NC-251:2013 como está libre de arcilla se permite hasta un 5%. El árido fino tiene un MF de 0.61%, cumple con la NC-251:2013.

El resultado del al árido grueso ensayo es de 1% y cumple con la NC-251:2013 que permite hasta 1.5% para áridos gruesos.

- Pesos específicos, y absorción de agua

Se obtienen los pesos específicos así como la absorción de agua para cada muestra de áridos (Tabla 6).

Tabla. 6. Resultado de ensayos pesos específicos y absorción de agua

	Árido Fino	Árido Grueso	escoria
Peso específico corriente (g/cm³)	2.56	2.61	3.07
Peso específico saturado (g/cm³)	2.61	2.65	3.10
Peso específico aparente (g/cm³)	2.70	2.71	3.17
Absorción de agua (%)	2.20	1.35	1.00

Al analizar los resultados de la muestras se evidencia que la escoria siderúrgica presenta un mayor peso específico debido fundamentalmente a su origen y contenido de impurezas metálicas, además absorbe menos agua que los áridos convencionales.

- Determinación del peso volumétrico

A continuación se exponen los resultados para cada una de ellas (Tabla.7)

Tabla. 7. Resultado de ensayos pesos específicos y absorción de agua

	Árido Fino	Árido Grueso	Escoria
P V S* (Kg/m3)	1582	1384	1810
P V C** (Kg/m3)	1668	1555	2018

PVS* Peso Volumétrico Suelto.

PVC** Peso Volumétrico Compactado.

Se aprecia que el árido alternativo de escoria tiene un peso Volumétrico mayor.

➤ Determinación del porcentaje de huecos.

El porcentaje de espacios vacíos de la muestra de escoria, presenta valores similares a los áridos calizos, por su parte la muestra natural de árido grueso resulta tener mayor porcentaje de huecos (Tabla.8).

Tabla. 8. Resultado del ensayo del % de vacío o de huecos.

	Árido Fino	Árido Grueso	Escoria
% de huecos	34.8	40.4	34.3

Diseño de las dosificaciones de hormigón mediante el método O'Reilly.

Para el diseño de las dosificaciones de hormigón, se aplicó el método O'Reilly el cual tiene en cuenta el menor porcentaje de vacío.

Teniendo en cuenta los porcentajes de vacío se escogieron las siguientes mezclas para su evaluación

- Patrón 1 (**P-1**): 45% A+E y 55% Gravilla
- Patrón 2 (**P-2**): 60% A+E y 40% Gravilla
- Patrón 3 (**P-2**): 55% A+E y 45% Gravilla

Dosificaciones gravimétricas.

Con la combinación de 45% A+E y 55% gravilla se obtuvo un peso total de los áridos de 1741.98 Kg para 1m³ de hormigón, obteniéndose una dosificación gravimétrica de:

- Cemento= 321Kg
- Agua= 215L

- Arena más escoria (A+E)= 1741.98 Kg $\times 0.45 = 783.9$ Kg
- Grava =1741.98 Kg $\times 0.55 = 958.1$ Kg

Combinación de 60% A+E y 40% gravilla, peso total de los áridos=1746.95Kg.

- Cemento = 321Kg
- Agua = 215 L
- Arena más escoria (A+E) = 1746.95 Kg $\times 0.60 = 1048.17$ Kg
- Grava =1746.95 Kg $\times 0.40 = 698.78$ Kg

Combinación de 55% A+E y 45% gravilla, peso total de los áridos=1745.29 Kg.

- Cemento = 321Kg
- Agua = 215 L
- Arena más escoria (A+E) = 1745.29 Kg $\times 0.55 = 959.9$ Kg
- Grava =1745.29 Kg $\times 0.45 = 785.38$ Kg

➤ Ensayo de resistencia a la compresión axial.

La resistencia a la compresión simple (Tabla 9.), que se emplea en el diseño y cálculo de elementos estructurales, es determinada por los resultados de los ensayos de control de las probetas normalizadas, sometidas a compresión axial mediante una prensa hidráulica y se define por la expresión estadística de resistencia característica. Para este ensayo se analizaron tres probetas de cada tipo a la edad de 7 y 28 días.

Tabla 9. Resultados de resistencia a compresión de las probetas cilíndricas.

Tipos de probetas.	7 días				28 días			
	R´b1	R´b2	R´b3	R´bs	R´b1	R´b2	R´b3	R´bs
P-1	24.9	22.6	19.8	22.4	29.7	28.3	25.5	27.8
P-2	22.1	21.5	20.9	21.5	26	25.5	24.9	25.5
P-3	22.8	22.6	22.1	22.5	29.4	28.3	27.2	28.3

- R´bi: Resistencia a compresión de cada una de las probetas ensayadas (MPa).
- R´bs: Resistencia a compresión media de las series de probetas (MPa).

- Las probetas fueron marcadas según la combinación de áridos empleada para su elaboración:

De forma general en la tabla 10. Se resume el estudio de dosificación realizado en la investigación. En la misma se plasman las dosificaciones gravimétricas, volumétricas y las dosificaciones en proporción para el hormigón de 20 MPa.

Tabla 10. Dosificación para hormigones de 20.0 MPa con sustitución de 20% de árido fino natural por escoria siderúrgica de la fábrica ACINOX de Las Tunas.

Muestras	R^b k (MPa)	Cemento	Asent (cm)	Dosificación	Cemento	Arena + Escoria	Piedra	Agua
Patrón 1	20	P-350	12	Gravimétrica (Kg/m ³)	321	783.9	958.1	215
				Volumétrica (m ³ /m ³)	0.103	0.295	0.367	0.215
				En proporción	1	2.9	3.6	0.67
Patrón 2	20	P-350	5	Gravimétrica (Kg/m ³)	321	1048.17	698.78	215
				Volumétrica (m ³)	0.103	0.394	0.268	0.215
				En proporción	1	3.80	2.60	0.67
Patrón 3	20	P-350	9	Gravimétricas (Kg/m ³)	321	959.9	785.38	246
				Volumétrica (m ³)	0.103	0.361	0.301	0.246
				En proporción	1	3.50	2.90	0.77

CONCLUSIONES

1. Se considera que la aplicación de este material es variada, lo que permite catalogarlas como materia prima alternativa para la elaboración de hormigones masivos
2. Mediante el método para combinar áridos; del rectángulo, se obtuvieron cuatro combinaciones de escoria y arena, a estas se les realizó el análisis granulométrico comparándolo con las especificaciones de la NC-251:2013, obteniéndose como resultado que la combinación de 20% de escoria y 80% de arena natural, es la más cercana a las exigencias de la norma, por lo que se decidió utilizarla en el diseño de los hormigones.
3. Se proyectó un hormigón, para obtener un valor de resistencia de 20.0 MPa, en el cual utilizando el método experimental de Vitervo O'Reilly se seleccionaron tres diseños de combinaciones de áridos finos y gruesos, con el fin de comprobar el comportamiento de la escoria en diferentes cantidades dentro del hormigón.
4. Las tres muestras ensayadas a compresión axial, a los siete y veintiocho días, presentaron resistencias equivalentes y superiores a lo proyectado para las edades ensayadas, llegando a la conclusión que las tres combinaciones son válidas para su utilización.

Bibliografía

1. Amaral de Lima Luciana (1999): Hormigones con escoria de horno eléctrico como áridos: Propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental. Tesis de doctorado. Universidad Politécnica de Barcelona.
2. Acevedo Catá J.; Martínez Lobeck E.; Rodríguez Díaz E.; Balbosa Amat E (1985): Materiales de Construcción. Departamento de Geotecnia y Materiales de Construcción. ISPAJE.
3. Centros de Estudios de Experimentación y Obras Públicas (CEDEX) (2007): Actualización del catálogo de residuos utilizables en la construcción. España.
4. Díaz Brito, Nelson (2000). Caracterización de las escorias de acería de la empresa metalúrgica antillana de acero José Martí de La Habana para su empleo como árido y adición de morteros, hormigones y productos de la construcción.
5. Divo Durruthy, Martha (2015) Sistema de gestión ambiental para una empresa siderúrgica en Cuba.
6. Decreto 104/2006, (2006): Valorización de escorias en la Comunidad Autónoma de Cantabria. BOC - Número 206.Pág 12727. España.
7. EHE (1999).Instrucción de hormigón estructural. EHE. Comisión Permanente del Hormigón, Madrid.
8. Luxán, (1995). Tipificación de escorias producidas por la siderurgia de horno eléctrico. como material utilizable en la construcción.
9. Nieves R, Leandro (2013). Evaluación de una muestra de dosificación de mortero convencional, con una dosificación de mortero con escoria de ACINOX Las Tunas como sustituyente del cemento Portland.
- 10.O´Reilly Díaz, Viterbo A (2013). Métodos para dosificar hormigones de elevado desempeño.
- 11.Oficina Nacional de Normalización NC-671: 2008. Áridos. Toma de muestras.
- 12.Oficina Nacional de Normalización NC-178:2002. Áridos. Análisis Granulométrico.
- 13.Oficina Nacional de Normalización NC-181:2002 Áridos. Determinación del peso Volumétrico. Método de ensayo.

14. Oficina Nacional de Normalización NC-182:2002. Determinación del material más fino que el tamiz 0.074mm (No.200). Método de Ensayo.
15. Oficina Nacional de Normalización NC-186:2002. Arena. Peso específico y absorción de agua. Método de ensayo.
16. Oficina Nacional de Normalización NC-177: 2002. Áridos. Determinación del porcentaje de huecos.
17. Oficina Nacional de Normalización NC-251:2013. Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos.
18. Oficina Nacional de Normalización NC-187:2002. Árido grueso. Peso específico y absorción de agua.
19. Oficina Nacional de Normalización NC-95:2001. Cemento Portland. Especificaciones.
20. Oficina Nacional de Normalización NC-991:2013. Áridos. Términos y Definiciones
21. Oficina Nacional de Normalización NC-120:2004. Hormigón hidráulico. Especificaciones.
22. Oficina Nacional de Normalización NC -174: 2002. Hormigón fresco. Determinación del asentamiento.
23. Oficina Nacional de Normalización NC-221:2002. Hormigón. Elaboración de probetas para ensayos.
24. Proénza P, Carlos (2014). Aplicación de las escorias siderúrgicas como áridos en la fabricación de morteros.
25. Srinivas, (1987). Uso de escorias oxidantes de horno básico de arco para producción de hormigón.
26. Sociedad Pública de Gestión Ambiental, IHOBE, S.A. (1999): Libro Blanco de Minimización de Residuos y Emisiones de Escorias de Acería. Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco.
27. Solange Mireya (2011): Empleo de las Escorias de acería como árido en la fabricación de morteros. Tesis de maestría. ISPAJE.