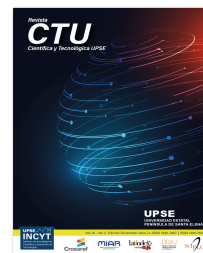


Artículo de investigación

Influencia del empleo de escorias negras siderúrgicas como árido grueso en las propiedades del hormigón

Influence of the use of black steel slag as coarse aggregate on concrete properties



Iatny De La Roz Martínez¹
René Antonio Puig Martínez²
Joaquín Rafael De La Torre Ramírez¹

✉ <https://orcid.org/0009-0005-5426-5893>
✉ <https://orcid.org/0000-0001-9025-4423>
✉ <https://orcid.org/0009-0000-5062-9251>

¹Escuela Interarmas de las FAR "General Antonio Maceo" | Ceiba del Agua - Cuba | CP 10699

²Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" CUJAE | La Habana - Cuba | CP 19390

✉ iatny.7909@gmail.com

<http://doi.org/10.26423/rctu.v11i2.818>

Páginas: 16- 25

Resumen

Una forma de reducir el negativo impacto ambiental que presenta la extracción de áridos naturales, es el aprovechamiento de los residuos como material de construcción. Ejemplo de ello son las escorias negras de horno de arco eléctrico, de las cuales, en Cuba, en la empresa siderúrgica "José Martí", se almacenan elevadas cantidades, sin valor de uso y con disímiles aplicaciones en la rama de la construcción. En la investigación se evaluó la influencia del empleo de estas escorias en la resistencia a compresión del hormigón de cemento portland, como reemplazo parcial o total de los áridos gruesos convencionales. Fueron diseñados hormigones con porcentos de reemplazos de 25 %, 50 %, 75 % y 100 %, determinando laborabilidad, densidad y resistencia a compresión, comparando con un hormigón patrón. Se demostró que estas propiedades tuvieron un comportamiento similar o superior a las del hormigón patrón, lo que brinda fiabilidad a su empleo.

Palabras clave: áridos artificiales, áridos de escoria, resistencia a compresión del hormigón.

Abstract

One way to reduce the negative environmental impact of natural aggregate extraction is to use industrial waste as construction material. An example of this is black slag from electric arc furnaces, of which high quantities are stored in Cuba at the José Martí steel company, with no use value and with various possible applications in the construction industry. The research evaluated the influence of using these slags on the properties of portland cement concrete, as a partial or total replacement for conventional coarse aggregates. Concretes were designed with replacement percentages of 25%, 50%, 75% and 100%, determining properties in the fresh and hardened state, comparing them with a standard concrete. It was shown that the properties of concretes with slags were similar or superior to those of the standard concrete, which provides reliability for their use.

Keywords: artificial aggregates, slag aggregates, compressive strength of concrete.

Recepción: 02/08/2024 | Aprobación: 18/10/2024 | Publicación: 26/12/2024

1. Introducción

Las facilidades que ofrece el hormigón como material de construcción hace que su demanda, y la de los áridos que lo constituyen, vayan en aumento cada año, lo que genera un incremento en la explotación de canteras con la afectación al medio ambiente y la desaparición de estos recursos naturales. Este es uno de los motivos por los cuales la comunidad científica desarrolla investigaciones dirigidas al empleo de nuevos materiales, capaces de sustituir parcial o totalmente los áridos naturales, que ocupan el mayor volumen de la masa de morteros y hormigones [1, 2]. La utilización de residuos de la construcción o industriales, así como otros materiales alternativos, permite una disminución en el consumo de recursos naturales no renovables, así como contribuye al ahorro de la energía necesaria para su extracción. Un ejemplo de ello es el empleo de los áridos artificiales y reciclados, como reemplazos de los áridos naturales, lo que constituye una forma de disminuir el impacto ambiental de su extracción. Entre los áridos artificiales y reciclados que más se emplean, están los residuos de construcción y demolición, los residuos sólidos urbanos, así como las escorias siderúrgicas (escorias de altos hornos o escorias de los hornos de arco eléctrico) [3, 4].

En el mundo, la producción de acero genera elevadas cifras de residuos industriales que se depositan en los patios de las fábricas o en vertederos, por lo que crean afectaciones al medioambiente y a la economía de los sectores implicados en ese proceso [5, 6]. Uno de los procedimientos que se emplean para la fabricación del acero es mediante hornos de arco eléctrico, en los cuales, las etapas básicas son la fusión de las chatarras mediante corriente eléctrica, y posteriormente, el afino del baño fundido. Las escorias del horno de arco eléctrico son uno de los productos de desechos de la industria metalúrgica que más se generan a nivel mundial. Según la Asociación Mundial del Acero, la producción mundial de acero crudo se incrementa a nivel global cada año [7]. Estos procesos de obtención del acero generan unos 400 millones de toneladas por año de escorias siderúrgicas y la escoria negra es la que ocupa el primer lugar en volumen de desechos. En general, se calcula que, por cada tonelada de acero producida, se generen aproximadamente entre 110 y 150 kg de escoria negra de horno de arco eléctrico (ENHAE) y de 20 a 30 kg de escoria blanca. Estos residuos generados, se deben separar y acopiar, lo que implica que sean necesarias amplias extensiones para almacenarlos, dando como resultado un problema para la acería, además de generar contaminación ambiental [8].

Las escorias siderúrgicas fueron utilizadas como un material de construcción en Inglaterra, por primera vez, durante el último tercio del siglo XVIII, generalizándose luego a otros países como Alemania y el resto de Europa. Sobre su campo de empleo en la rama de la construcción se han realizado múltiples investigaciones a nivel mundial, como, por ejemplo, su utilización en explanadas, bases y subbases de carreteras; en la fabricación del cemento; y como áridos en la producción de morteros y hormigones [9, 10]. En Cuba existen dos industrias con esta tecnología: la empresa de aceros inoxidables ACINOX, en la provincia de Las Tunas y la empresa siderúrgica “José Martí”, conocida como Antillana de Acero. En esta última, ubicada en la provincia de La Habana, se almacenan en sus patios extensos depósitos de escorias, que abarcan volúmenes en el orden

de los 120 000 m³ y con tendencia al incremento. En el país se han realizado estudios sobre su utilización como áridos finos para morteros, en la confección de bloques de hormigón, en mezclas asfálticas y como adición en el cemento [3, 11, 12, 13]. La bibliografía consultada demuestra que la investigación de su empleo ha sido más amplia en la construcción de obras viales, aunque en los últimos años se aprecia una tendencia creciente hacia investigaciones que la emplean como áridos para morteros y hormigones [9, 14, 15, 16]. Varios de estos trabajos científicos se han desarrollado con los materiales residuales de estas empresas, pero en muy pocos se ha logrado demostrar, a partir de la caracterización específica de la escoria negra generada en la Antillana de Acero, su comportamiento como reemplazo del árido grueso, en las propiedades del hormigón de cemento portland.

Varios autores [4, 8, 9, 16, 17], coinciden en que las escorias negras presentan propiedades físicas, mecánicas y químicas que se corresponden con otras piedras naturales tales como el basalto y el granito, de uso común en la ingeniería civil, de forma tal que se puede aprovechar su empleo en la construcción. La dureza, la textura, el tamaño y la porosidad de las escorias negras dependen de la temperatura del enfriamiento, controlado o no. Es por ello que si se enfrían más rápidamente con agua estas escorias serán más porosas, de tamaño relativamente pequeño y en estado vítreo; mientras que si se dejan enfriar al aire serán menos porosas, más compactas, duras y cristalinas, lo que se debe al enfriamiento más lento. La composición química de las escorias negras es muy variable debido a distintos factores, como son la materia prima que se utilice, los factores termodinámicos del proceso metalúrgico, el producto objeto de fabricación y el posterior tratamiento de las mismas [18, 10]. En esa composición química, la cual está condicionada por el tipo de chatarra que se emplee, se puede encontrar SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MnO , MgO , SO_3 , P_2O_5 , K_2O y Na_2O . El mayor contenido en la masa total de escoria se encuentra en la sílice (SiO_2), la alúmina (Al_2O_3), la cal (CaO) y la magnesita (MgO), que forman una serie de minerales. Un elevado contenido de óxido de silicio en las escorias les brinda a estas un carácter ácido; el alto contenido de óxido de calcio les da carácter básico.

Una de las propiedades más analizadas en las escorias radica en los estudios de los compuestos potencialmente expansivos (Cl^- , SO_3 , CaO libre y MgO libre). Es por ello que su utilización no puede ser inmediata, debido a las variaciones de volumen de estos componentes en estado activo, lo cual puede afectar negativamente los procesos y el resultado de su empleo. Se han desarrollado diferentes métodos para resolver la problemática de la inestabilidad, la cual se logra mediante la hidratación de la cal y la magnesita libre. Una de estas formas es mediante la maduración y el envejecimiento de la escoria al dejarla a la intemperie, en pilas expuestas, durante un periodo de tiempo que oscila entre los 3 días (obteniendo expansión inferior al 1%) y los 120 días (garantizando expansiones en torno al 0,3%). Las mismas se deben voltear cada cierto tiempo para lograr una mejor homogeneidad porque una simple deposición sin volteos demuestra que solo serán útiles los 20 cm de profundidad. Del mismo modo, otra variante es el enfriamiento rápido utilizando agua en aspersión, y de esta forma se evita la desintegración y se garantiza que se maduren entre las 72 horas y los 45 días [5, 15, 18, 19].

De todo lo antes expuesto, al analizar los resultados de las

investigaciones realizadas a nivel nacional e internacional, se aprecia que son variados y amplios los usos que tienen las escorias del horno de arco eléctrico en la construcción. Sin embargo, en el país y, específicamente en los residuos generados en la empresa Antillana de Acero, se aprecia la carencia de estudios sobre el comportamiento de las ENHAE, como reemplazo de los áridos gruesos, en las propiedades del hormigón de cemento Portland. La mayoría de los resultados han sido encaminados a su empleo en carreteras o como árido fino para morteros. Sólo se tuvo acceso al resultado de una investigación de 2023 [20].

Es por ello que, sobre la base del conocimiento científico, se decide realizar la presente investigación con el objetivo de evaluar la influencia del empleo de las ENHAE, como reemplazo del árido grueso, en la resistencia a compresión del hormigón de cemento portland, a escala de laboratorio y para las condiciones de Cuba.

2. Materiales y Métodos

Las materias primas que se utilizaron en el experimento fueron: áridos grueso y fino procedente cada uno de la cantera Dragón Camoa, de la provincia de Mayabeque. Como aglomerante, cemento portland P-35 de la fábrica Siboney en la provincia de Artemisa, de 35 MPa de resistencia a compresión, a 28 días. Además, el aditivo superplastificante reductor de agua Dynamon SR-356. Las escorias negras, provenientes de los residuos de la empresa siderúrgica “José Martí” (Antillana de Acero), del municipio Cotorro, en la provincia de La Habana.

Para la caracterización de los áridos se utilizaron técnicas experimentales a nivel macroestructural: análisis granulométrico, masa específica, absorción de agua, porcentaje de partículas de arcilla, masa volumétrica (suelta y compactada), porcentaje de huecos y composición química. Cada uno de estos ensayos fue realizado cumpliendo lo que establecen las normas cubanas correspondientes. En el caso de las escorias negras se realizaron, además de las anteriores, otras técnicas microestructurales: difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X (FRX), para determinar respectivamente la composición mineralógica y química. Para caracterizar las propiedades del aditivo se realizaron los ensayos previstos en las normas cubanas vigentes, comprobando el cumplimiento de las especificaciones de diseño. Las propiedades físicas, mecánicas y químicas del cemento P-35 se determinaron de acuerdo a las especificaciones normadas. Se llevó a

cabo la caracterización de los hormigones con el empleo de técnicas macroestructurales: ensayos de consistencia y densidad en estado fresco; y resistencia a compresión en estado endurecido.

Para el análisis de la resistencia a compresión se realizó un diseño de experimento unifactorial completamente al azar. Contando con que existen determinadas variables que se mantienen constantes o dentro del mismo rango para cada mezcla que se analiza, como son: relación agua/cemento, tipo de cemento y cantidad de este, tipo de aditivo utilizado, tipo de árido natural, y que solo se modificó en la mezcla la inclusión o no de escorias negras del horno de arco eléctrico, se decidió emplear un caso de estudio con un solo factor, en este caso, la mezcla de hormigón con cinco niveles, en función del porcentaje de sustitución de las ENHAE (0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 %). Para desarrollar los experimentos se elaboraron las mezclas de hormigón en el laboratorio del Centro de Servicios Técnicos de Ingeniería y Tecnología de la Construcción (CITEC), institución acreditada; además, se realizaron en el propio laboratorio los ensayos a los materiales constituyentes y a las probetas, con todas las condiciones y el equipamiento requerido para cumplir los mismos con rigor. Las unidades experimentales fueron 90 probetas de hormigón, las cuales cumplieron con todas las características planteadas en las normas cubanas NC 167 y NC-ISO 1920-3.

El diseño del experimento permitió estimar y comparar los efectos que los diferentes tratamientos asignados aleatoriamente a un factor, producen en la característica observada, en las diferentes unidades experimentales. Se empleó el análisis de varianza para contrastar las hipótesis de igualdad de media poblacionales eligiendo entre las dos hipótesis que se plantean (H0 y H1). La prueba de hipótesis se realiza para comprobar la probabilidad, con un 95 % de confiabilidad (error en las mediciones del 5 %), de rechazar H0 sobre la hipótesis de que H0 es cierta, asumiendo una distribución normal. Asimismo, se llevó a cabo un estudio de prueba de múltiples rangos para definir diferencias entre medias. En correspondencia con el objetivo de la investigación y para desarrollar los experimentos se diseñaron cinco dosificaciones de hormigón, a partir de las combinaciones de los diferentes niveles de reemplazo de escorias y el hormigón patrón. Cada una de ellas y los materiales que se emplearon, medidos en peso para elaborar un metro cúbico de hormigón, se aprecian en la Tabla 1. Todas responden a una resistencia característica del hormigón de 30 MPa.

Tabla 1: Diseño de las dosificaciones para 1 m³ de hormigón

Resistencia a compresión (MPa)	Porcentaje de reemplazo	Cemento (kg)	Agua (l)	Gravilla (kg)	Escoria (kg)	Arena (kg)	Aditivo (kg)
30	0	405	175	915	–	785	5,37
	25	405	175	726	242	785	5,37
	50	405	175	515	515	785	5,37
	75	405	175	274	822	785	5,37
	100	405	175	–	1175	785	5,37

3. Resultados y Discusión

Resultados de los ensayos a los materiales

Como resultado del análisis de los ensayos realizados a las materias primas utilizadas se demostró que todas

cumplieron con los requisitos para su empleo en las diferentes dosificaciones del experimento. Entre las propiedades de los áridos gruesos naturales y las escorias negras (material de reemplazo como árido grueso), no existieron diferencias significativas en sus valores y ambos cumplieron con las

especificaciones previstas en las normas cubanas vigentes (Tabla 2). Entre estas especificaciones se incluye el

cumplimiento del por ciento pasado, tanto en la grava utilizada, como en la ENHAE.

Tabla 2: Resultados de los ensayos físicos a los áridos gruesos empleados

Análisis físico	Unidad de medida	Gravilla	Escoria	Especificaciones
Masa específica corriente	g/cm ³	2,52	3,23	≥ 2,5
Masa específica saturada	g/cm ³	2,59	3,28	–
Masa específica aparente	g/cm ³	2,71	3,41	–
Masa unitaria suelta	kg/m ³	1 345	1 538	–
Masa unitaria compactada	kg/m ³	1 508	1 674	–
Porcentaje de absorción	%	2,88	1,62	≤ 3
Porcentaje tamiz 200	%	0,23	0,93	≤ 1
Porcentaje de huecos	%	40,10	48,14	–
Porcentaje de terrones de arcilla	%	0,06	0	≤ 0,25
Porcentaje de partículas planas y alargadas	%	0	0	≤ 10
Tamaño máximo del árido (TMA)	mm	25,4	19,1	–

Es válido señalar que los resultados coinciden con los obtenidos en investigaciones precedentes [3, 4, 8, 21, 16, 20]. Una característica que resaltó en la comparación fue la masa específica corriente. En este caso las escorias negras resultaron más densas y estuvieron por encima de la masa específica de las gravillas (Figura 1 a), lo que se corresponde con las conclusiones de otros investigadores [4, 9, 21, 11, 20] y están comprendidas en la categoría de áridos pesados según la clasificación descrita en la norma cubana NC 120. Este efecto puede ser causado por la alta presencia de hierro en su composición microestructural que se encuentra en todos sus estados posibles de oxidación. De esta forma, la utilización de las escorias negras debe estar limitada a elementos elaborados con hormigones donde este parámetro no tenga influencia. Por otro lado, los valores de la absorción resultaron menores en las ENHAE (Figura 1 b), lo cual corroboró lo que mencionan otros científicos al respecto (que su valor está comprendido entre 1 % y 4 %) [17, 11, 22, 10, 20]. Este fenómeno puede estar asociado al enfriamiento de las mismas a la salida del horno eléctrico y a su disgregación natural debido a este efecto, en el cual el material se cuartea y se rompe por las zonas más porosas y, por lo tanto, más débiles. Como ya fue planteado, esta propiedad depende del método de enfriamiento de las escorias, resultando menos

porosas cuando el proceso es más lento y a la intemperie, como es el caso de las empleadas en esta investigación.

El comportamiento en el porcentaje de huecos resultó similar en ambos materiales, las escorias negras superaron a las gravillas sólo en un 8 %. Este parámetro se vincula también al método de enfriamiento utilizado, pues cuando ocurre la desgasificación de las escorias, una parte de los gases presentes en el proceso queda en las escorias en forma de burbujas y una vez solidificadas, adquieren estructura porosa y ahuecada. No obstante, durante el proceso de envejecimiento, estos poros continúan cerrándose y las escorias se vuelven mucho más densas y compactas con el tiempo [7, 8, 22, 20]. De forma semejante, el porcentaje de terrones de arcilla no presentó diferencias, ya que fue mucho menor a la unidad en los áridos y nulo en las ENHAE, muy inferior al valor que exige la norma de hasta 0,25 %. En el caso de las partículas planas y alargadas, el resultado de los ensayos demostró la no existencia en ninguno de los dos materiales; esto se debe a que cuando las escorias son trituradas el material se rompe sin una distribución definida, en forma cúbica, lo que provoca la no presencia de partículas planas y alargadas. De esta forma se demuestra la fiabilidad de la utilización de las escorias como árido en la mezcla de hormigón, cumpliendo con las especificaciones de diseño.

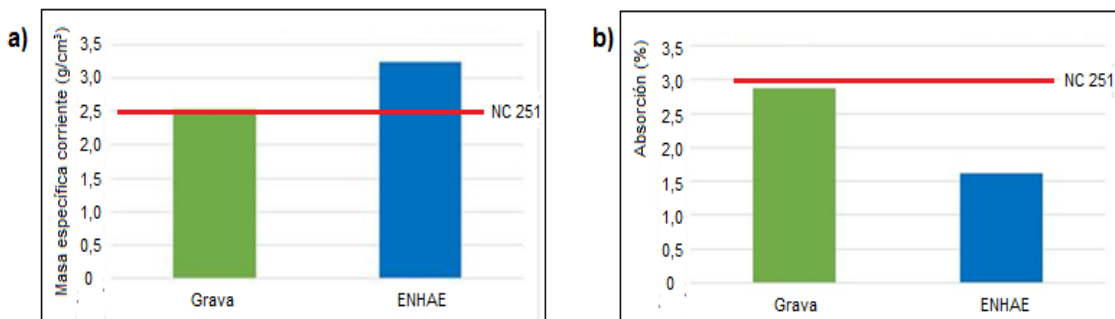


Figura 1. Comparación entre las propiedades de los áridos gruesos empleados: a) masas específicas corrientes; b) porcentos de absorción

Resultados de los ensayos al hormigón en estado fresco

Para la determinación del asentamiento se empleó el cono de Duff Abrams. Los resultados de los valores medios, para cada diseño de dosificación, aparecen en la Tabla 3. Estos se compararon con las especificaciones de la norma cubana

NC 120. En la tabla se puede constatar cómo, a medida que aumenta el porcentaje de sustitución del árido grueso por escorias negras, la laborabilidad de la mezcla comenzó a disminuir. En el caso de la variante de dosificación con el 100 % de sustitución, los resultados correspondieron a mezclas plásticas.

Tabla 3: Resultados del asentamiento por el cono de Abrams

Variante de dosificación	Asentamiento (mm)	Tipo de mezcla
Patrón	175	Fluida
25 %	120	Blanda
50 %	120	Blanda
75 %	100	Blanda
100 %	90	Plástica

Esta disminución en la laborabilidad, incluso con el empleo de aditivos superplastificantes, se asocia al incremento del rozamiento de las partículas de escorias (por su morfología) y a su elevada densidad. También es una posible consecuencia de la falta de finos en las partículas de escorias negras, que se observa en su análisis granulométrico, así como por su forma puntiaguda y ángulos con bordes afilados, lo que coincide con las conclusiones de otras investigaciones con iguales resultados [4, 9, 21]. Como se conoce, la forma de los áridos influye en la trabajabilidad del hormigón. Los áridos con forma angular (como las ENHAE) requieren mayor cantidad de agua de amasado que los áridos redondeados. De igual forma, como estos áridos siderúrgicos son más irregulares que los naturales, tienen una superficie específica mayor y ello trae consigo rellenos irregulares en la pasta de cemento, formando grumos. Sin embargo, esta forma angular propicia mayor adherencia y, por tanto, una elevada resistencia mecánica. Si estos tienen una granulometría uniforme, los huecos dejados por las partículas mayores serán rellenados por las partículas más pequeñas, con su capa lubricante alrededor, mejorando por tanto la laborabilidad.

Los valores de densidad de las diferentes mezclas en estado fresco se aprecian en la Tabla 4, observando cómo, a medida que aumentan los porcentajes de sustitución de las escorias por las gravillas, los valores de la densidad van aumentando.

Esto es un resultado que se deriva de la masa específica de las escorias negras del horno de arco eléctrico, la cual es mayor que la masa específica de los áridos naturales utilizados. Al ser las ENHAE más densas y pesadas que los áridos naturales, es de esperar que los hormigones con sustitución de escorias resulten más densos que los hormigones convencionales [8, 16, 10, 20]. Es por ello que una recomendación, si es necesario, podría ser el reemplazo parcial y no total de los áridos naturales, así como la combinación del árido grueso siderúrgico con los áridos finos naturales de menores densidades. De esta forma se evita el aumento de la densidad del hormigón, que equivale a una pérdida de dispersión de la mezcla y una mayor energía de compactación.

Resultados de los ensayos al hormigón en estado endurecido

En correspondencia con la norma cubana NC 192 se determinó la resistencia característica real a compresión. Las probetas de hormigón fueron cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Las muestras se curaron por inmersión en agua y se ensayaron en la prensa *Controls Automax 5* de 2 000 kN, a las edades de 7, 28 y 90 días. La Tabla 5 contiene los valores para cada dosificación, a las tres edades estudiadas y, al mismo tiempo, se presentan los porcentajes de incrementos entre ellas.

Tabla 4: Resultados de la densidad en estado fresco de los hormigones diseñados

Variante de dosificación	Densidad (kg/m ³)
Patrón	2 405
25 %	2 483
50 %	2 558
75 %	2 591
100 %	2 682

Tabla 5: Valores de resistencia a compresión en función del tiempo

Mezcla de hormigón	7 días(MPa)	28 días(MPa)	Aumento entre 7 y 28 días (%)	90 días(MPa)	Aumento entre 28 y 90 días (%)
Patrón	36	44	22	50	14
25 %	34	39	15	47	21
50 %	32	38	19	43	14
75 %	34	39	15	45	15
100 %	30	38	27	44	16

En esta tabla se aprecia que los resultados superan, en todos los casos y en gran medida, el valor de diseño de 30 MPa a 28 días, incluso a los 7 días ya era igual o superior. El incremento de resistencia entre los 7 y 28 días presenta un orden de magnitud semejante para todas las dosificaciones, situándose en el entorno del 20%. Por otro lado, la variación en la resistencia a compresión a largas edades muestra diferencias en el orden del 15% (90 días con respecto a los 28 días).

Una vez que se obtuvieron los resultados de los ensayos de resistencia a compresión a 28 días (Tabla 6), para cada serie de probetas, se efectuó el procesamiento estadístico mediante el *software Statgraphics Centurion XV*, teniendo en cuenta que existe variabilidad en los valores obtenidos durante los ensayos y para comprobar si estas diferencias son significativas.

Tabla 6: Resultados de las mediciones para la resistencia a compresión

Mezcla de hormigón	Observaciones (MPa)	Total	Promedio	S ²
Patrón	43,5 44,4 44,5	132,4	44,13	0,303
25 %	38,5 39,1 39,4	117,0	39,00	0,210
50 %	37,3 38,1 39,1	114,5	38,17	0,813
75 %	38,6 39,0 39,0	116,6	38,87	0,053
100 %	38,0 38,4 38,6	115,0	38,33	0,093

Se empleó el análisis de varianza para contrastar las hipótesis de igualdad de medias poblacionales, mediante la tabla ANOVA y sus resultados aparecen en la Tabla 7. Teniendo en cuenta que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, se demuestra que existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de la variable dependiente resistencia a compresión y entre un nivel del factor de

cada por ciento de mezcla y otro, con un nivel del 95% de confianza. Como el P-valor de la tabla ANOVA es pequeño se examina la media de la muestra para determinar cuáles son significativamente diferentes unas de otras. El gráfico de medias es el habitual para realizar esta comparación junto a su intervalo de confianza. En la Figura 2, se muestran los resultados del modelo ANOVA en formato gráfico.

Tabla 7: Análisis de varianza para la variable resistencia a compresión (Tabla ANOVA)

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	75,1733	4	18,7933	63,78	0,0000
Intra grupos	2,94667	10	0,294667		
Total (Corr.)	78,12	14			

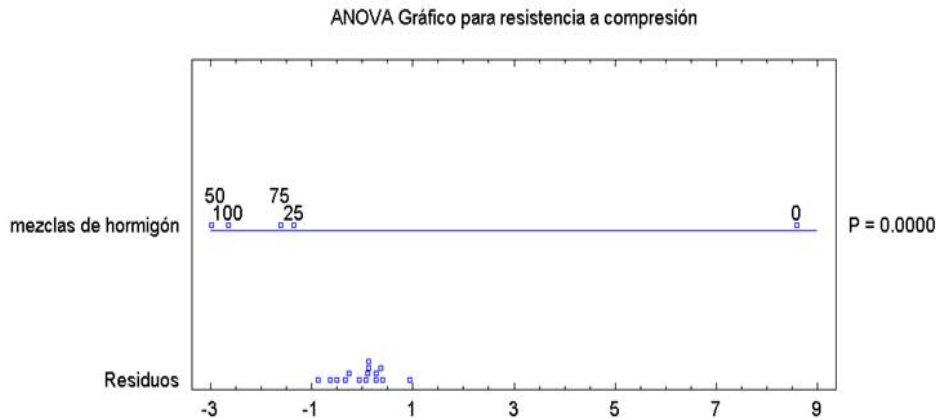


Figura 2. Gráfico ANOVA del modelo

En la parte inferior del gráfico hay un diagrama de puntos de los residuos del modelo. En el ANOVA simple, los residuos son iguales a las diferencias entre cada observación y la media de todas las observaciones de ese grupo. La variabilidad observada en los residuos es indicativa de la variabilidad natural entre los diferentes niveles de porcentajes de reemplazos. Representados por encima de la línea central están escaladas las desviaciones de las medias de los grupos respecto de la media total de las $n = 5$ observaciones.

Este grupo de desviaciones está escalado de modo que su variabilidad pueda ser comparada con la de los residuos. Los grupos cuyos puntos están demasiado lejos probablemente provengan de una distribución con extensión similar a la de los residuos, como corresponde a poblaciones diferentes. En la Figura 2, la muestra al 0% parece estar bastante separada de las otras muestras. La separación de las otras cuatro medias es menos clara. Una comparación más formal de las medias de las cinco muestras se describe en la Figura 3.

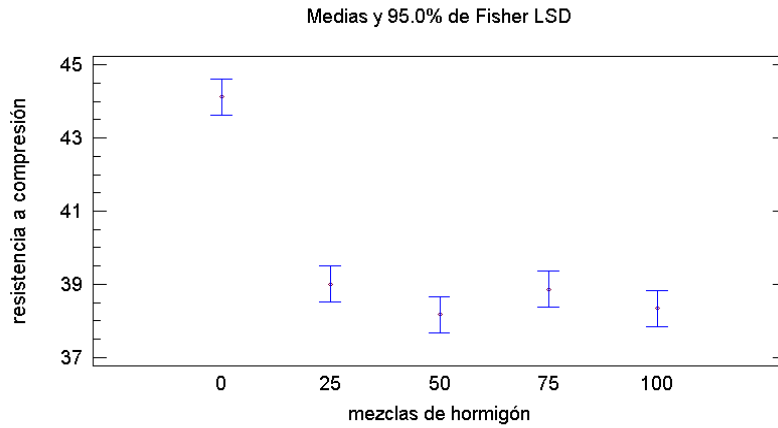


Figura 3. Intervalo LSD de Fisher

El intervalo LSD de Fisher (*Least Significant Difference*) representado en la Figura 3, y elaborado para un 5 % de error, muestra que la media a 0% difiere significativamente de las otras cuatro muestras. Sin embargo, las muestras a 25 %, 50 %, 75 % y 100 %, se solapan. De la misma forma, se observa con el HSD de Tukey (*Honestly Significant*

Difference), que estos intervalos controlan el error con una tasa del 5 %. Para mostrar el mismo análisis en forma tabular, se puede realizar la prueba de rango múltiple que determina cuáles medias son significativamente diferentes unas de otras. Los resultados de esta prueba se aprecian en las Tablas 8 y 9.

Tabla 8: Prueba de rango múltiple para la variable resistencia a la compresión

Nivel	Casos	Media	Grupos homogéneos
50 %	3	38,1667	X
100 %	3	38,3333	X
75 %	3	38,8667	X
25 %	3	39,0000	X
0 %	3	44,1333	X

Tabla 9: Comparación de las medias mediante la prueba LSD

Contraste	Significancia	Diferencia	+/- Límites
0 % - 25 %	*	5,133330	0,987559
0 % - 50 %	*	5,966670	0,987559
0 % - 75 %	*	5,266670	0,987559
0 %- 100 %	*	5,800000	0,987559
25 %- 50 %		0,833333	0,987559
25 %- 75 %		0,133333	0,987559
25 %- 100 %		0,666667	0,987559
50 %- 75 %		-0,700000	0,987559
50 % - 100 %		-0,166667	0,987559
75 %- 100 %		0,533333	0,987559

En la Tabla 8, se han identificado dos grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. Un grupo homogéneo es aquel para el que no hay diferencias significativas. En la Tabla 9 se observa la salida para cada par de medias. La columna "Diferencia" muestra la media simple del primer grupo menos la del segundo. La columna "+/- Límites" muestra un intervalo de confianza para la diferencia. Cualquier par de medias para el cual el valor absoluto de la diferencia exceda el límite presenta diferencia estadísticamente significativa al nivel de confianza seleccionado y es representado por un 5 % en la columna "Significancia". En el caso actual, el asterisco que se encuentra al lado de los cuatro pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas, con un

nivel del 95 % de confianza.

A modo de resumen, durante el procesamiento estadístico para esta variable dependiente se observa, que la resistencia media es diferente para las distintas dosificaciones. Sin embargo, la variabilidad entre los porcentos de cada una de las muestras está cercana de ser la misma. Por tanto, desde el punto de vista de los autores, cada uno de los hormigones diseñados, con los diferentes porcentos de reemplazos, cumplen con los requerimientos especificados en relación a la resistencia a compresión como una propiedad en estado endurecido.

4. Conclusiones

Al comparar sus propiedades, las escorias negras resultan más densas que las gravillas debido a la presencia de altos contenidos de hierro (en todas sus formas posibles) en su composición, lo cual corrobora lo descrito por las investigaciones precedentes. La absorción de las escorias negras resulta menor que en los áridos gruesos empleados, lo que se justifica a partir del proceso de enfriamiento lento y extenso, en el tiempo, que propicia estructuras internas más compactas y menos porosas en las ENHAE.

En el asentamiento de los hormigones se observan mezclas entre fluidas y blandas, aunque el diseño con el 100% de escorias resulta de consistencia plástica. Esto evidencia que, con el aumento del porcentaje de escorias negras, la laborabilidad de las mezclas disminuye, lo que debe ser tenido en cuenta durante los procesos de diseño. Las densidades de los hormigones con escorias, tanto en estado fresco como en estado endurecido, son superiores al hormigón patrón, lo que se explica por la mayor densidad de este árido siderúrgico. Las resistencias a compresión son similares en todos los hormigones, de un 12% mayor, aproximadamente, en el hormigón patrón. En las cinco dosificaciones se obtienen valores superiores a los 30 MPa especificados por el diseño

El estudio se limitó al análisis de las propiedades de hormigones elaborados con la misma materia prima y resistencia a compresión, a fin de evitar el impacto de otros factores excepto los que se pretendía evaluar, en este caso la influencia del empleo de la escoria como reemplazo del árido grueso, y se logra demostrar, que el empleo de las ENHAE como reemplazo de los áridos gruesos, es una alternativa factible para elaborar hormigones de cemento portland con las mismas posibilidades de empleo de un hormigón convencional de resistencia a compresión de 30 MPa. Ello puede ser generalizado a hormigones elaborados con materias primas que cumplan similares propiedades, siempre previa comprobación.

Fuentes de financiamiento:

Los autores manifiestan que el manuscrito no tuvo fuente de financiamiento.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran no tener conflicto de intereses

Contribución de auditoría - CRediT

Escritura: I. De la Roz, R.Puig, J. De la Torre Gestión: I. De la Roz, R.Puig, J. De la Torre Recursos y tecnología: I. De la Roz, R.Puig Investigación: I. De la Roz, R.Puig, J. De la Torre

5. Referencias

1. CONCRETONLINE. Datos de la producción del hormigón en el segundo trimestre de 2022. *Punto de encuentro para profesionales del hormigón* [online]. 2022. Disponible en: <https://www.concretonline.com/hormigon/datos-de-la-produccion-del-hormigon-en-el-segundo-trimestre-de-2022>.
2. ROJAS-MANZANO, MANUEL ALEJANDRO, OTÁLVARO CALLE, IVÁN FERNANDO, PÉREZ CAICEDO, JAVIER ALEXANDER, BENAVIDES, HÉCTOR MAURICIO, AMBRIZ FREGOSO, CARLOS. Uso de las escorias de horno de arco eléctrico (EHAE) en la construcción – estado del arte. *Revista UIS Ingenierías* [online]. 2021, vol. 20, n.º 2, págs. 53-64. Disponible en: <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n2-2021005>.
3. PÉREZ ZAYAS, YASSER. Empleo de las escorias de acería como árido en la fabricación de hormigones. *Tesis de Maestría, CECAT, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", La Habana, Cuba* [online]. 2017. Disponible en: <https://cujae.edu.cu/estudios/nube-cujae>.
4. LUCAS GUTIÉRREZ, IÑIGO. Análisis de propiedades de hormigones con sustitución total de árido grueso por subproductos industriales (escoria de acería) y residuos de construcción y demolición. *Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Bilbao, España* [online]. 2022. Disponible en: <https://addi.ehu.es/handle/10810/58597>.
5. MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO. Análisis de la aplicación del concepto de fin de condición de residuo de las escorias de fundición de horno de arco eléctrico. *EMGRISA, Gobierno de España* [online]. 2021. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/images/es/estudio_fcr_escorias_vdef_julio21_tcm30-529624.pdf.
6. LARREA, MACARENA, FERNÁNDEZ, JORGE, CISNEROS, JUAN, ELGORRIAGA, ANDER. Materias primas críticas y metales clave para la industria Vasca. *Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco* [online]. 2024.
7. WORLDSTEEL ASSOCIATION. World Steel in Figures. [Online]. 2023. Disponible en: <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2023/>.
8. MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOCRÁTICO. Análisis de la aplicación del FCR-Escorias de fundición-Aplicaciones ligadas y nolidas. *Gobierno de España, Engrisa* [online]. 2021. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=960418>.

9. BRAVO ALCÍBAR, JOSÉ ANTONIO, GARCÍA GÓMEZ, MARCELO ANDRÉS, GUERRA MERA, JUAN CARLOS. Análisis de la escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en la resistencia y resistividad en el hormigón. *Revista Dominio de las Ciencias* [online]. 2024, vol. 10, n.º 2, págs. 987-1001. Disponible en: <https://doi.org/10.23857/dc.v10i2.3841>.
10. GONZÁLEZ ORTEGA, MARTHA ALEJANDRA. Comportamiento y diseño de hormigones estructurales con áridos siderúrgicos EAF. Aguado de Cea, Antonio. *Tesis de Doctorado, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España* [online]. 2015. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=81556>.
11. RONDÓN QUINTANA, HUGO ALEXANDER, RUGE CÁRDENAS, JUAN CARLOS, MUÑIZ DE FARIÁS, MARCIO. Uso de la escoria de alto horno como agregado pétreo en una mezcla de concreto asfáltico. *Revista Ciencia y Construcción* [online]. 2020, vol. 1, n.º 2, págs. 11-19. Disponible en: <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/11>.
12. SOLER SÁNCHEZ, EUNICE Y BOZA REGUEIRA, MAILE. Utilización de escorias de horno de arco eléctrico en bases granulares de carreteras. En actas de XII Simposio Internacional de Estructuras y Geotecnia 2019. [Online]. 2019. Disponible en: <https://convencion.uclv.cu/es/event/xii-simposio-internacional-de-estructuras-y-geotecnia-2019-xii-coloquio-de-geotecnia-y-cimentacion-5/track>.
13. FERNÁNDEZ PÉREZ, ALEXANDER, ZUÑIGA IGARZA, LIBYS MARTA Y URBINA REYNALDO, MARÍA ONELIA. Evaluación de escoria de acería de horno de arco en hormigones de 20.0 MPa. En actas de X Conferencia Internacional de Aprovechamiento de Recursos Minerales. CINAREM'20. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez". [Online]. 2020. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/333090098_X_CONFERENCIA_INTERNACIONAL_DE_APROVECHAMIENTO_DE_RECURSOS_MINERALES_CINAREM2022.
14. MUÑOZ PÉREZ, SÓCRATES PEDRO, CABRERA ALCÁNTARA, ANTONNY LUIS, DELGADO BRAVO, CARLOS CÉSAR, RENILLA LAU, PAULA ALEJANDRA. Comportamiento físico mecánico del hormigón adicionando residuos de acero: una revisión literaria. *Revista UIS Ingenierías* [online]. 2022, vol. 21, n.º 1, págs. 57-72. Disponible en: <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n1-2022005>.
15. BUITRAGO MUÑOZ, YUDY ALEJANDRA. Evaluación de algunas propiedades físico mecánicas en muestras cilíndricas de concreto estructural con sustitución de 5%, 10% y 15% de cemento por escoria de siderurgia. *Encuentro Internacional de educación de Ingeniería ACOFI 2022* [online]. 2022. Disponible en: <https://doi.org/10.26507/paper.2356>.
16. ASTORGANO RODERA, PATRICIA. Análisis de las posibilidades de valorización de la escoria negra de horno de arco eléctrico en la comunidad autónoma del País Vasco. [Online]. 2020. Disponible en: <https://addi.ehu.es/handle/10810/46920>.
17. VIZCAÍNO MÉNDEZ, GABRIEL ANTONIO, SILVA URREGO, JIMMY FERNANDO. Influencia de la escoria de cobre como material cementicio suplementario en morteros. *Revista EIA* [online]. 2023, vol. 20, n.º 40, págs. 1-24. Disponible en: <https://doi.org/10.24050/reia.v20i40.1709>.
18. MORÁN MENÉNDEZ, ANTHONY MICHAEL, PARRALES CANTO, GLIDER NUNILLO, CARVAJAL RIVADENEIRA, DANIEL DAVID. Revisión bibliográfica sobre la escoria de acería como complemento del cemento hidráulico Holcin Fuerte. *Revista Científica de la Universidad de Ciencias Informáticas* [online]. 2021, vol. 14, n.º 2, págs. 219-232. ISSN 2306-2495. Disponible en: <https://publicaciones.uci.cu/index.php/serie/article/view/778>.
19. PÉREZ ROJAS, YASMÍN ANDREA, VERA LÓPEZ, ENRIQUE. Compressive strength of concrete made with electric arc furnace slag and recycled ground glass as replacement of coarse and fine aggregate. *Revista Ingeniería de Construcción* [online]. 2021, vol. 36, n.º 3, págs. 342-360. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.7764/ric.00007.21>.
20. ROJAS, NICOLÁS, BUSTAMANTE, MARIOM, MUÑOZ, PEDRO, GODOY KARINA, LETELIER, VIVIANA. Study o properties an behavior of concrete containing EAF slag as coarse agregate. *Revista Evolución del Entorno Construido* [online]. 2020, vol. 14, n.º 100137. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100137>.

21. SOSA GUTIÉRREZ, AMAURY, CUÉTARA RICARDÓ, JOAQUÍN. Evaluación de morteros de albañilería elaborados con áridos reciclados mixtos y escoria blanca en reemplazo del hidróxido de calcio. *Revista Ciencia y Futuro* [online]. 2022, vol. 9, n.º 3, págs. 81-97. ISSN 2306-823X. Disponible en: <https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistacyf/article/view/1832>.
22. TOMALÁ PALMA, OSCAR JOEL, POZO REYES, JAZMÍN YADIRA. Diseño de hormigones de cemento portland de resistencias de 210, 240 y 280 kg/cm² con agregado grueso de escoria de acero de alto horno. Martínez Palma, Richard Iván. *Universidad estatal de la Península de Santa Elena, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera de Ingeniería Civil* [online]. 2022. Disponible en: <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/8432>.



Artículo de **libre acceso** bajo los términos de una **Licencia Creative Commons Reconocimiento – NoComercial – CompartirIgual 4.0 Internacional**. Se permite que otros remezclen, adapten y construyan a partir de su obra sin fines comerciales, siempre y cuando se otorgue la oportuna autoría y además licencien sus nuevas creaciones bajo los mismos términos.