

ppi 201502ZU4659

Esta publicación científica en formato digital es
continuidad de la revista impresa

ISSN 0254 -0770 / e-ISSN 2477-9377 / Depósito legal pp 197802ZU38



REVISTA TÉCNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- REDALYC
- REDIB
- SCIELO
- DRJI
- INDEX COPERNICUS INTERNATIONAL
- LATINDEX
- DOAJ
- REVENCYT
- CHEMICAL ABSTRACT
- MIAR
- AEROSPACE DATABASE
- CIVIL ENGINEERING ABTRACTS
- METADEX
- COMMUNICATION ABSTRACTS
- ZENTRALBLATT MATH, ZBMATH
- ACTUALIDAD IBEROAMERICANA
- BIBLAT
- PERIODICA

UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Dr. Humberto Fernández Morán
"Mis luchas son las del Quijote,
batallas que uno pierde, pero
gana la causa!"



Evaluación de la Durabilidad en Hormigones Elaborados con Escoria Negra de Horno de Arco Eléctrico

Joel Baile Yong ¹  Giovany Alemán Carmona ¹ 
René A. Puig Martínez ¹ 

¹ Centro de Estudios de la Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT), Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE), Ave. 114 N°. 11901, Marianao 19390, La Habana, Cuba.

Autor de correspondencia: joelba@civil.cujae.edu.cu

<https://doi.org/10.22209/rt.v47a07>

Recepción: 23 octubre 2024 | Aceptación: 06 noviembre 2024 | Publicación: 19 diciembre 2024.

Resumen

Las empresas siderúrgicas generan un gran volumen de escoria negra en la producción de acero, lo que supone un problema ambiental que se incrementa en el tiempo, siendo una solución darle valor agregado en la fabricación de hormigones, ya sea como árido o como material cementante suplementario. El objetivo de esta investigación fue evaluar las propiedades de durabilidad de hormigones elaborados con escoria negra a modo de árido grueso. Se midieron algunas propiedades de durabilidad del hormigón: resistividad, velocidad del pulso ultrasónico, penetración de iones cloruro y profundidad de penetración de agua a presión, empleando como metodología sustituir el 100% del árido grueso natural por escoria negra triturada, y comparando con un hormigón de control. Los resultados mostraron que el hormigón fabricado con 100% de escoria presentó propiedades de durabilidad ligeramente más desfavorables al que contenía árido natural, en particular, se evidenció probabilidad de corrosión de las armaduras de refuerzo de acero. Pero ello no debe constituir una causa de rechazo, sino un elemento a tener en cuenta al emplearlo, como, por ejemplo, en hormigones en masa o en hormigones reforzados con barras de polímeros, y crea pautas para seguir investigando con otros porcentajes menores de sustitución.

Palabras clave: durabilidad; escoria negra; hormigón; propiedades.

Evaluation of the Durability of Concrete made with Black Slag from Electric Arc Furnace

Abstract

Steel companies generate a large volume of black slag in the production of steel, which represents an environmental problem that increases over time, a solution being to give this waste added value in the manufacture of concrete, either as aggregate or as supplementary cementitious material. The objective of this research was to evaluate the durability properties of concrete made with black slag as coarse aggregate. Some durability properties of concrete were measured: resistivity, ultrasonic pulse velocity, chloride ion penetration and depth of penetration of pressurized water., using the methodology of replacing 100% of the natural coarse aggregate with crushed black slag, and comparing it with concrete patron. The results showed that the manufactured concrete presented durability properties slightly lower than those that used natural aggregate, in particular, there was evidence of a probability of corrosion of the steel reinforcement bars. But this should not constitute a cause for rejection, but rather an element to be taken into

account when using it, such as mass concrete or concrete reinforced with polymer bars, and creates guidelines to continue researching with others for smaller replacement rates.

Keywords: black slag; concrete; durability; properties.

Avaliação da Durabilidade em Concretos Feitos com Escória Negra de Forno Elétrico a Arco

Resumo

As siderúrgicas geram um grande volume de escória preta na produção de aço, o que representa um problema ambiental que aumenta com o tempo, e uma solução é agregar valor à mesma na fabricação de concreto, seja como agregado ou como material cimentício complementar. O objetivo desta pesquisa foi avaliar as propriedades de durabilidade de concretos fabricados com escória preta como agregado graúdo. Foram medidas algumas propriedades de durabilidade do concreto: resistividade, velocidade do pulso ultrassônico, penetração de íons cloreto e profundidade de penetração da água pressurizada, utilizando como metodologia a substituição de 100% do agregado graúdo natural por escória preta britada, e comparando com um concreto controle. Os resultados mostraram que o concreto fabricado com 100% de escória apresentou propriedades de durabilidade um pouco mais desfavoráveis do que aquele contendo agregado natural, em especial, ficou evidente a probabilidade de corrosão da armadura de aço. Mas isso não deve constituir motivo de rejeição, mas sim um elemento a ser levado em consideração na sua utilização, como, por exemplo, em concreto massa ou concreto reforçado com barras poliméricas, e cria diretrizes para futuras pesquisas com outros percentuais de substituição menores.

Palavras-chave: durabilidade; escória preta; concreto; propriedades.

Introducción

El hormigón de cemento portland constituye una mezcla homogénea de cemento, áridos finos y gruesos, agua, adiciones y aditivos, que una vez unidos transita por dos estados: se manifiesta inicialmente como un líquido denso hasta que ocurren las primeras reacciones de hidratación del cemento portland; y transcurridas entre una y tres horas, pasa a un estado endurecido, incrementando progresivamente sus propiedades mecánicas y de durabilidad. En los dos estados las propiedades dependen mucho de la materia prima empleada (De la Roz y Puig, 2021; Fogliatti et al., 2023; Mendoza y Díaz, 2023). Como componentes que ocupan entre el 80% y el 85% de la masa del hormigón, la calidad y propiedades de los áridos constituyen variables de enorme influencia en la calidad y propiedades del hormigón en los dos estados. Los áridos mayoritariamente utilizados provienen de la trituración de las rocas, provocando la explotación de canteras daños irreversibles al medio ambiente (Rea, 2023; Aguilar, 2024). Ha sido este uno de los motivos por el cual, a nivel internacional, se han desarrollado investigaciones dirigidas a dar valor de uso a determinados desechos industriales y de la construcción para su progresiva utilización como sustitutos de los áridos naturales. Entre estos desechos industriales, se encuentra la escoria negra de horno de arco eléctrico (Villao, 2021; Costa et al., 2022).

El proceso de fabricación del acero en las acerías de horno de arco eléctrico, tanto común como especial, se compone de dos etapas: en una primera, denominada metalurgia primaria y desarrollada en su totalidad en el horno de arco eléctrico, se produce la fusión de las materias primas; y una segunda, denominada metalurgia secundaria o afino del baño fundido, que se inicia en el horno eléctrico y finaliza en el horno cuchara (Rojas et al., 2021; Andrea y Vera, 2021). La etapa de metalurgia primaria, también llamada de fusión, incluye una serie de fases como la de oxidación, dirigida a eliminar impurezas de manganeso y silicio, la desfosforación y la formación de escoria espumante en la que se acumulan todas las impurezas. Es precisamente de esta escoria espumante que se extraen las escorias negras al final de la etapa de fusión (Rojas et al., 2021).

En la construcción, concretamente en la fabricación de hormigones hidráulicos de cemento portland, la literatura científica recoge dos prestaciones principales para las escorias negras: su empleo como sustituto parcial de áridos finos o gruesos; o su utilización como material cementante suplementario (Rojas et al., 2021; Andrea y Vera, 2021; Dhanabal y Sushmitha, 2021; Pérez et al., 2021). Como áridos, las escorias negras se caracterizan por la elevada masa específica, forma angular, textura superficial áspera, gran dureza y absorción de agua media; presentan buena resistencia a la abrasión, fragmentación y compresión (Andrea y Vera, 2021; Dhanabal y Sushmitha, 2021; Pérez et al., 2021; Rashad, 2022). Estas propiedades hacen que al comparar el árido siderúrgico con el convencional, se observe

que el primero tiene un comportamiento físico y mecánico semejante o superior a los áridos provenientes de la trituración de las rocas. Como en la mayoría de las aplicaciones se realiza la sustitución de tan solo una parte de los áridos gruesos convencionales (Pérez et al., 2021), resulta insuficiente la información que se tiene sobre el comportamiento durable de los hormigones elaborados totalmente con escoria negra, en particular cuando se sustituye el 100% de los áridos gruesos. Se hace necesario por tanto, evaluar el comportamiento durable de hormigones que emplean escoria negra como áridos y su influencia en la corrosión de las barras.

Para evitar el deterioro del hormigón se prevén diseños de mezclas que garanticen propiedades de durabilidad. Entre las variables a tener presentes para garantizar un hormigón durable, se pueden mencionar la calidad del propio hormigón, la agresividad del medio ambiente y la corrosión del acero de refuerzo (Benítez et al., 2020; Cedeño et al., 2022; Guerra et al., 2023). Los principales factores de deterioro del hormigón pueden ser físicos o químicos (Zhang y Su, 2019). La corrosión de las armaduras de refuerzo es el principal problema de durabilidad y uno de los aún no resueltos satisfactoriamente por la tecnología del hormigón (Camacaro et al., 2023; Chiné et al., 2024). El modelo de Tutti es el más difundido y aceptado hoy por la comunidad científica en los análisis de durabilidad, y tal como puede apreciarse en la Figura 1, considera un período de iniciación y un periodo de propagación, en el cual la armadura se corroe hasta llegar a un grado de deterioro que compromete la funcionalidad (Ossorio y Lorenzo, 2014; Chiriboga, 2022; Camacaro et al., 2023; Chiné et al., 2024).



Figura 1. Modelo de vida útil de las estructuras de hormigón armado según Tutti (Ossorio y Lorenzo, 2014).

Son diferentes los procedimientos recogidos en la bibliografía especializada para evaluar la durabilidad de las estructuras. Entre los procedimientos más utilizados se encuentran la determinación de la resistividad eléctrica de especímenes de hormigón (Guerra et al., 2019; Castañeda et al., 2021; Sohail et al., 2021); de la velocidad de propagación de un pulso ultrasónico a través de la masa de este material (Lorenzi et al., 2017; Socarrás et al., 2020); de la profundidad de penetración del agua a presión (Llanos et al., 2023); y de la penetración de iones cloruro en la masa de hormigón (Guerra et al., 2019; Sohail et al., 2021; Castañeda et al., 2021; Freitas y Meira, 2023).

Precisamente, el presente artículo persigue el objetivo de exponer ante la comunidad científica, los resultados de una investigación en curso en el Centro de Estudios para la Construcción y Arquitectura Tropical, perteneciente a la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, que pretende evaluar el comportamiento durable de un hormigón elaborado con escorias negras de horno de arco eléctrico como árido grueso, en sustitución del 100% de gravilla proveniente de la trituración de rocas calizas, tomando como base los resultados en probetas de hormigón de los ensayos de resistividad, velocidad del pulso ultrasónico, penetración de iones cloruro y penetración de agua a presión.

Materiales y Métodos

Para cumplir con el objetivo propuesto en la investigación se utilizó un modelo experimental de comparación simple. El factor o variable independiente que se evaluó fue la sustitución del 100% de gravilla por árido grueso obtenido de la trituración de escoria negra en la elaboración del hormigón. Se seleccionó la sustitución total de la gravilla proveniente de rocas naturales por cuanto, en las investigaciones precedentes, se hicieron estudios de sustitución parcial con resultados satisfactorios; pero no se encontraron resultados de investigaciones cuando se sustituye el 100%.

Las variables dependientes medidas estuvieron formadas por un conjunto de propiedades manejadas por la comunidad científica internacional (Guerra et al., 2019; Sohail et al., 2021) y utilizadas en Cuba (Socarrás et al., 2020; Castañeda et al., 2021) para caracterizar la durabilidad de los hormigones, en este caso, resistividad eléctrica, velocidad del pulso ultrasónico, penetración de iones cloruro y profundidad de penetración de agua bajo presión.

Materia prima empleada

La materia prima empleada en la investigación estuvo compuesta por cemento portland P-35 de uso general (NC 1340, 2020; ASTM C595/C595M, 2021), arena triturada, gravilla triturada y gravilla proveniente de la trituración de la escoria, ambas con tamaño máximo de 19 mm, y aditivo superplastificante Dynamon SRC 20. Todos los componentes empleados cumplieron las especificaciones normadas en Cuba. De esta materia prima, la única que recibió tratamiento previo para la fabricación del hormigón fue la escoria negra. Este material no puede ser utilizado de inmediato una vez recepcionado, ya que tiene que pasar previamente por un proceso de trituración y posterior separación según su granulometría, con el fin de utilizarlo como un árido grueso, fotos de cuyo proceso se muestran en la Figura 2



Figura 2. Trituradora modelo LEM 4825 empleada y muestra de la escoria triturada.

Dosificaciones empleadas en la investigación

Como el objetivo de la investigación radica en comprobar el comportamiento durable de un hormigón cuando se sustituye el 100% del árido triturado por escoria, y no evaluar sus propiedades físicas y mecánicas, no fue necesario el diseño propiamente de una dosificación específica, sino, que se tomó una de las dosificaciones empleadas por el Centro de Estudios para la Construcción y Arquitectura Tropical para los servicios científico técnicos que desarrolla este centro de investigaciones, a la que se le aplicó el modelo experimental planteado. La dosificación seleccionada se correspondió con un hormigón de 40 MPa de resistencia a compresión a 28 días, elaborado con la materia prima descrita. En este, la relación agua/cemento en masa fue de 0,4, propia de diseños de dosificaciones en ambientes muy agresivos en Cuba. En base al diseño experimental previsto, se mantuvieron constantes las proporciones de cemento, agua, arena y aditivo, sustituyendo la masa de gravilla natural triturada por igual masa de gravilla de escoria negra triturada. La cantidad de aditivo empleado fue el suficiente para obtener una mezcla de consistencia blanda medida con el cono de Abrams (NC ISO 1920-2, 2010). En la Tabla 1 se pueden apreciar las dos dosificaciones empleadas para el desarrollo de la investigación: La dosificación 1 de control; la dosificación 2 con escoria.

Tabla 1. Dosificación para un metro cúbico de hormigón utilizada en el experimento.

Materiales	Unidades de medida	Dosificaciones de hormigón	
		Dosificación 1	Dosificación 2
Cemento	kg	463	463
Agua	kg	185	185
Arena	kg	850	850
Gravilla natural	kg	863	-
Gravilla de escoria	kg	-	863
Aditivo Dynamon SRC 20	L	1,75	1,75

Con cada una de estas dos dosificaciones fueron elaboradas las mezclas de prueba de 30 L en el laboratorio, cantidad suficiente para confeccionar las probetas para los ensayos. El proceso de elaboración y curado de las probetas hasta la edad de los ensayos, se efectuó siguiendo lo establecido, tanto en la norma cubana como internacional (NC 412, 2005; NC-ISO 1920-3, 2010). Los moldes utilizados para la confección de las probetas fueron cilíndricos de 100 x 200 mm, con un volumen 1,57 L.

Determinación y procesamiento de las variables dependientes del experimento

En el experimento, para cada dosificación se elaboraron dos mezclas de prueba, una principal y la otra su réplica. A cada una de estas mezclas de prueba se le elaboraron tres probetas para los ensayos.

Resistividad

Para la determinación de la resistividad, se utilizó el equipo de fabricación inglesa marca CNS Farnell, dispositivo de prueba de laboratorio para la medición rápida, fácil y precisa de la resistividad eléctrica superficial del hormigón basada en la técnica de cuatro sondas (Wenner-Array), midiendo valores de resistividad a los 3, 7 y 28 días. El procedimiento de medición de la resistividad se efectuó siguiendo las especificaciones establecidas en la norma internacional (ASTM C1760, 2021). A cada probeta se le midieron cuatro valores de resistividad, lo que permitió obtener en total 24 valores de cada dosificación para el procesamiento estadístico de los resultados. Al evaluar los resultados se tuvieron en cuenta las recomendaciones establecidas por la red DURAR, reconocidas y utilizadas como efectivas en el mundo académico. En la Tabla 2 se muestran las mismas.

Tabla 2. Criterios de evaluación para el riesgo de corrosión de la armadura según valores de resistividad por la Red DURAR.

Resistividad eléctrica (k Ω .cm)	Riesgo de corrosión
< 10	Alto
10 – 200	Moderado
> 200	Poco

Velocidad del pulso ultrasónico

La velocidad del pulso ultrasónico en los hormigones elaborados con las dosificaciones, se determinó según lo establecido en la norma cubana y la internacional (NC 231, 2002; ASTM C597, 2022), empleando para ello el equipo Pundit Lab de fabricación suiza marca Proceq. Se midieron valores de velocidad del pulso ultrasónico a 3, 7 y 28 días y para la evaluación de los resultados también se siguieron las especificaciones de la red DURAR que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Criterios de evaluación para la calidad del hormigón de acuerdo con los resultados de la velocidad del pulso ultrasónico según la Red DURAR.

Velocidad del pulso ultrasónico (m/s)	Calidad del hormigón
< 2000	Deficiente
2001 – 3000	Normal
3001 – 4000	Alta
> 4000	Durable

Penetración de iones cloruro

El procedimiento empleado para determinar la penetración de iones cloruro en el hormigón, se basó en la medición de la cantidad de corriente eléctrica que pasa a través de un testigo, la cual está relacionada con la resistencia del espécimen a la penetración de iones cloruro, siguiendo lo establecido en la norma internacional (ASTM C1202, 2012). Según esta, se mide la corriente con intervalos de 30 minutos en el período establecido entre 0 y 6 h. Se empleó en la medición el equipo E3645A de fabricación estadounidense marca Agilent, recogiendo en la Tabla 4 los criterios establecidos en la norma de referencia para evaluar la penetrabilidad de iones cloruro en el hormigón.

Tabla 4. Penetrabilidad de iones cloruro basada en la carga que pasa (ASTM C1202, 2012).

Carga que pasa (Coulomb)	Penetrabilidad de iones cloruro
>4000	Alta
2000 – 4000	Moderada
1000 – 2000	Baja
100 – 1000	Muy baja
<100	Despreciable

Penetración de agua bajo presión

La penetración de agua bajo presión permite medir hasta que profundidad puede entrar agua en un hormigón sometido a presión hidrostática, determinada según lo establecido en la norma cubana y la española (NC 248, 2005; UNE-EN 12390-8, 2020). Se efectuó a edades de 35 y 60 días, lo que está en correspondencia con las normas de referencia, que plantean efectuar este ensayo siempre a edad superior a 28 días. De esta manera puede evaluarse la variabilidad de los resultados en el tiempo.

En el procesamiento estadístico de los resultados de cada una de las variables de salida se empleó el programa Statgraphics Centurion versión XIX, evaluando cada uno de los parámetros estadísticos y la existencia o no de diferencias significativas entre las dos dosificaciones.

Resultados y Discusión

Resistividad

La Figura 3 muestra el comportamiento de la resistividad eléctrica media a las tres edades de ensayo de las dos dosificaciones de hormigón.

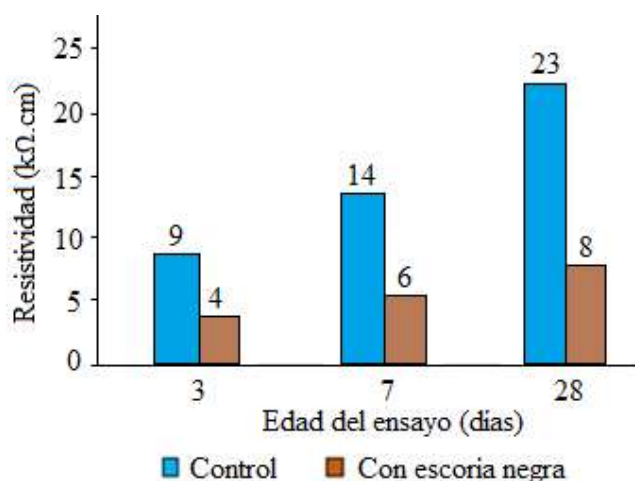


Figura 3. Comportamiento de la resistividad eléctrica en las dos dosificaciones.

Al analizar el comportamiento, se puede concluir que la resistividad eléctrica en las dos dosificaciones de hormigón estudiadas aumenta a medida que se incrementa la edad de ensayo, lo que se corresponde con las investigaciones desarrolladas en estudios de durabilidad por Guerra et al. (2019) y Castañeda et al. (2021). Según las investigaciones de Pérez et al. (2021), el hormigón elaborado empleando escoria negra en sustitución parcial de gravilla triturada muestra menor resistividad que el hormigón de control, ya que la escoria negra como material

presenta pequeñas porciones de hierro visibles en su composición, que son heredadas de su formación cuando se funde la chatarra para hacer el acero, lo que las hace más conductoras y menos resistentes al paso de la corriente. Los resultados obtenidos con 100% de sustitución de gravilla por escoria corroboran más aún lo obtenido por Pérez et al. (2021) cuando se efectúa sustitución parcial, motivo por el cual el riesgo de corrosión en el acero del hormigón armado elaborado con 100% de sustitución de gravilla por escoria es alto; mientras el hormigón control, elaborado con gravilla, presenta sólo moderado riesgo.

Para comprobar si las diferencias eran estadísticamente significativas, los resultados fueron analizados a la edad de 28 días utilizando el programa computacional Statgraphics Centurion versión XIX. En este tipo de investigación, los valores del sesgo y la curtosis estandarizados pueden usarse para comparar si las muestras provienen de distribuciones normales. Valores de estos estadígrafos fuera del rango de -2 a +2, indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar las pruebas que comparan las desviaciones estándar. En este caso, ambos valores de sesgo y curtosis estandarizadas se ubicaron dentro del rango esperado, lo que permitió pasar a evaluar si las diferencias entre las dos dosificaciones eran estadísticamente significativas. En el procesamiento estadístico seguido, se rechazó la hipótesis nula sobre la igualdad entre las dos dosificaciones, o sea, se corroboró la existencia de una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de resistividad de las dos dosificaciones, con un nivel de confianza del 95%.

Velocidad del pulso ultrasónico

En la Figura 4 se pueden apreciar los resultados obtenidos al medir las velocidades del pulso ultrasónico alcanzados por cada serie de probetas, en las tres edades de ensayo de ambas dosificaciones. A la izquierda, los valores de velocidad del pulso ultrasónico alcanzados a las edades de 3, 7 y 28 días por el hormigón control elaborado empleando gravilla triturada a modo de árido grueso; y a la derecha, los correspondientes al hormigón elaborado con sustitución del 100% de la grava natural por escoria negra. Puede apreciarse que los valores medidos de velocidad de propagación del pulso ultrasónico son menores cuando se sustituye el 100% de la gravilla por escoria, lo que se corresponde con los resultados de las investigaciones efectuadas por Pérez et al. (2021), en este caso con sustitución de hasta un 40%. La explicación de la disminución de la velocidad de propagación del pulso ultrasónico viene dada por la existencia de mayor porosidad en los áridos provenientes de escoria siderúrgica. Sin embargo, los valores obtenidos al medir la velocidad del pulso ultrasónico en las dos dosificaciones están por encima de los 4000 m/s, lo que se corresponde con un hormigón durable según la red DURAR (Tabla 3).

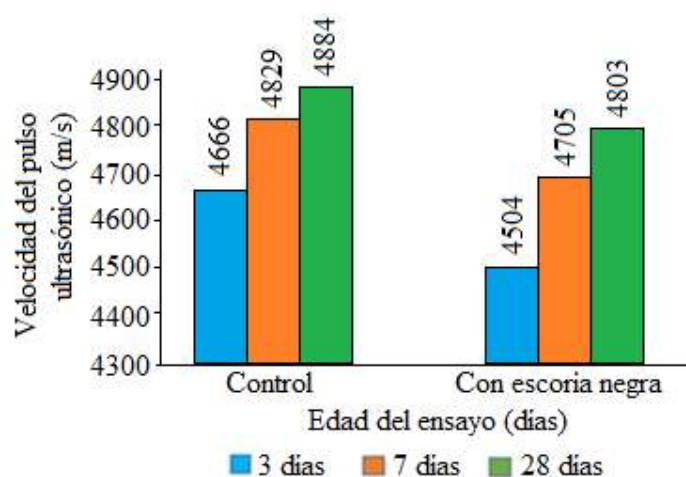


Figura 4. Resultados de la velocidad del pulso ultrasónico.

Con independencia de cumplir con la red DURAR, se analizó la existencia o no de diferencias estadísticamente significativas en la velocidad del pulso ultrasónico entre las dos dosificaciones, empleando igualmente el programa Statgraphics Centurion versión XIX. Aquí también, los valores del sesgo y la curtosis se encuentran dentro del rango de -2 a +2, lo que indica que las muestras provienen de una distribución normal, y al igual que ocurrió con la resistividad, permite realizar las pruebas que comparan las medias y las desviaciones estándar, y determinar de esta manera, si la diferencia entre los estadígrafos correspondientes a la velocidad del pulso ultrasónico de las dos dosificaciones, son estadísticamente significativas. A diferencia de la resistividad, en esta propiedad se constata que

no existen diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%. De este resultado se infiere que si bien, con la sustitución del 100% de escoria por gravilla disminuye lógicamente la velocidad de propagación del pulso ultrasónico (Pérez et al., 2021), esta disminución no es significativa, manteniéndose como un hormigón durable.

Penetración de iones cloruro

La Tabla 5 muestra los resultados obtenidos en el ensayo de penetración de iones cloruro. Los mismos, en particular la carga total pasada, deben utilizarse con cautela especialmente en aplicaciones tales como el control de calidad. Este método de ensayo puede dar lugar a conclusiones engañosas, ya que sus resultados son una función de la resistencia eléctrica del espécimen y la presencia de materiales conductores embebidos puede tener un efecto significativo.

En el hormigón control empleando a modo de áridos gruesos gravilla triturada, la carga total pasada es de 3524 culombios, por lo que según la norma internacional ASTM C1202 (2012) la penetrabilidad de iones cloruro tiende a ser moderada. A diferencia de ello, en el hormigón que emplea a modo de áridos gruesos 100% de escoria negra, la carga total pasada es de 10517 culombios, lo que infiere una penetrabilidad alta.

Tabla 5. Resultados del ensayo de penetración de iones cloruro en las dos dosificaciones.

Edad de las mediciones (min)	Dosificación 1		Dosificación 2	
	Corriente (amperios)	Carga total que pasa por la probeta (culombios)	Corriente (amperios)	Carga total que pasa por la probeta (culombios)
0	0,126		0,322	
30	0,141		0,406	
60	0,152		0,463	
90	0,162		0,510	
120	0,171		0,539	
150	0,179		0,552	
180	0,186	3524	0,570	10517
210	0,192		0,568	
240	0,198		0,572	
270	0,202		0,586	
300	0,206		0,607	
330	0,210		0,622	
360	0,214		0,636	

Era esperado el incremento de la penetrabilidad de iones cloruro, ya corroborada por las investigaciones de Pérez et al. (2021) y Rojas et al. (2021) con sustitución parcial de gravilla triturada por escoria siderúrgica, aunque no en los niveles obtenidos. En este caso, con sustitución del 100% de la gravilla, la carga pasada es superior a la obtenida en las anteriores investigaciones, y, por tanto, alta la penetrabilidad esperada de iones cloruro en el hormigón, lo que incrementa la probabilidad de corrosión de las armaduras de refuerzo. La explicación a este fenómeno puede buscarse en la mayor porosidad de la escoria en relación con la gravilla empleada en la dosificación control; pero puede ser también un resultado engañoso por la presencia de residuos ferrosos en la escoria, con mayor conductividad. Sometidos estos resultados a evaluación estadística mediante el programa Statgraphics Centurion versión XIX, se constata la existencia de diferencias estadísticamente significativas en los resultados de este parámetro entre la dosificación control y la dosificación con 100% de escoria.

Profundidad de penetración de agua a presión

La Tabla 6 muestra los resultados del ensayo de la profundidad de penetración del agua bajo presión, medida a edades de 35 y 60 días, con una diferencia de 25 días entre cada medición, lo que permite observar su variabilidad en el tiempo.

Aquí el resultado obtenido a edad de 35 días no se corresponde con el obtenido a edad de 60 días. A la primera de estas edades, la profundidad de penetración de agua a presión es mayor en el hormigón elaborado con áridos gruesos naturales que en el hormigón fabricado con 100% de escoria negra; contradictoriamente, ya a los 60 días, la

profundidad de penetración del agua a presión empleando escoria es casi la misma que la obtenida empleando áridos naturales. El resultado permite inferir que el hormigón elaborado con escoria, va incrementando la profundidad de penetración del agua a presión en el tiempo, lo que puede explicarse también debido a que este árido siderúrgico es más poroso que el árido proveniente de la trituración de rocas naturales y presenta un porcentaje de absorción de agua mayor que la gravilla, estando el hormigón fabricado con ellos más expuesto a la acción de agentes agresivos presentes en el agua, que los hormigones fabricados con áridos naturales. Sin embargo, evaluados los resultados mediante el programa Statgraphics Centurion, la diferencia no es estadísticamente significativa, por lo que se recomienda continuar la investigación realizando ensayos de profundidad de penetración de agua a presión a edades superiores a los 60 días, comparando con los valores obtenidos.

Tabla 6. Resultados del ensayo de profundidad de penetración de agua bajo presión.

Edad del ensayo (días)	Dosificación	Peso antes del ensayo (g)	Peso después del ensayo (g)	Profundidad máxima (cm)	Área de penetración (cm ²)
35	1	1828,20	1831,60	2,1	12,00
60		1819,08	1821,16	2,1	15,15
35	2	1780,40	1782,60	1,2	8,30
60		1810,90	1812,79	2,2	11,28

Conclusiones

La sustitución total de gravilla triturada por escoria demuestra disminución en las propiedades de durabilidad del hormigón. A través de los ensayos de resistividad, penetración de iones cloruro, penetración de agua a presión y velocidad de propagación del pulso ultrasónico, se demuestra que la sustitución total de la gravilla puede favorecer los procesos de corrosión del acero en su etapa de iniciación; y en la etapa de propagación, acelerar el proceso. Como conclusión, no debe emplearse la sustitución total de la gravilla por escoria en hormigones reforzados con barras de acero, pero sí es factible su empleo en hormigones no reforzados o en hormigones reforzados con barras de polímeros.

Una segunda conclusión importante, teniendo en cuenta que físicamente no es elevada la diferencia de los resultados de los ensayos entre hormigón de control y hormigón con sustitución total de gravilla por escoria, es la necesidad de dar continuidad a la investigación con sustitución parcial de la gravilla natural por escoria en porcentajes no investigados anteriormente.

Referencias Bibliográficas

Aguilar, P. (2024). Evaluación de los impactos ambientales en la cantera Taparachi generados por la explotación de materiales empleados en la construcción. *Revista Multidisciplinar Ciencia Latina*, 8(2), 1307-1326.

Andrea, Y., Vera, E. (2021). 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*, 36(3), 342-360.

Asociación Española de Normalización, UNE-EN 12390-8 (2020). "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión", Madrid, España.

ASTM International, ASTM 595/595M (2021). "Standard Specification for Blended Hydraulic Cements", 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States.

ASTM International, ASTM C 597 (2022). "Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete", 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

ASTM International, ASTM C 1202 (2012). "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration", 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

ASTM International, ASTM C 1760 (2021). "Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete", 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

Benítez, P., Rocha, E., Rodrigues, M. (2020). Estrategias para la inspección óptima de estructuras de hormigón armado sujetas a corrosión. *Revista Ciencia Tecnología e Innovación*, 2(2), 46-58.

Camacaro, A., Picón, L., Sánchez, M., T., de Rincón, O., Millano, V. (2023). Evaluación de los daños por corrosión de una estructura de concreto armado expuesta a un ambiente costero industrial. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia*, 40, e234615.

Castañeda, A., Corvo, F., Pech, I., Valdés, C., Marrero, R., Ángel, M. (2021). Atmospheric corrosion in an oil refinery located on a tropical island under new pollution situation. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(32).

Castañeda, A., Valdés, C., Viña, J., Verdecia, U., Corvo, F., Marrero, R. (2021). *Comparación de la penetración de iones cloruro en los pilotes de hormigón armado de la Terminal de Cruceros en la bahía de La Habana, Cuba*. XVI Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XVIII de Control de la Calidad de la Construcción (CONPAT-2021). Río de Janeiro, Associação Brasileira de Patologia das Construções, ID-455, Sección 7C – Control.

Cedeño de Sánchez, A., Hernández, C., Ortiz de Vergara, F., Villar, J. (2022). Acción del microambiente sobre el concreto reforzado. *Revista Prisma Tecnológico*, 13(1), 10-16.

Chiné, B., Jiménez, R., Cuevas, R. (2024). Modelación computacional de la corrosión del refuerzo metálico de un concreto carbonatado. *Revista Tecnología en Marcha*, 37(1), 51-64.

Chiriboga, C. (2022). Influencia de la corrosión en varillas de acero de refuerzo y sus efectos en la resistencia estructural de edificaciones. *Journal Scientific MQRInvestigar*, 6(4), 396-419.

Costa, M., Valões, D., Nascimento, C., Lima, E., Silva, G., Silva, T., Santos, T. (2022). Analysis of concrete characteristics with the replacement of natural fine aggregate by industrial solid waste. *Revista ALCONPAT*, 12(3), 328-343.

De la Roz, I., Puig, R. (2021). Mathematical model to predict the compressive strength of concrete in 28 days. *Revista Cubana de Ingeniería*, 12(1), 58-66.

Dhanabal, P., Sushmitha, K. (2022). Effect of iron ore tailing and glass powder on concrete properties. *Revista Ingeniería de Construcción*, 37(1), 47-57.

Fogliatti, F., Carrasco, M., Beltrami, L., Defagot, C. (2023). Effect of past and fine aggregate content on pervious concrete. *Revista Tecnología y Ciencia*. 21(46), 18-40.

Freitas, M., Meira, G. (2023). Transport capacity of chloride ions in concretes with mineral additions used in Brazil. *Revista ALCONPAT*. 13(1), 61-79.

Guerra, J., Castañeda, A., Corvo, F., Howland, J., Rodríguez, J. (2019). Atmospheric corrosion of low carbon steel in a coastal zone of Ecuador: Anomalous behavior of chloride deposition versus distance from the sea. *Materials and Corrosion*, 70(3), 444-460.

Guerra, J., Puig, R., Castañeda, A., Baque, B. (2023). Estado del arte sobre durabilidad de las estructuras de hormigón armado en perfiles costeros. *Revista INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 6(11), 2-20.

Llanos, J., Sota, E., Huaricallo, Y., Romero, Y. (2023). *Analysis of concrete $f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$, 210 kg/cm^2 , 245 kg/cm^2 and 280 kg/cm^2 of low permeability, subjected to high water pressures*. 21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology. Buenos Aires, Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, Session 38B T4-P2, LACCEI2023.1.1.557.

- Lorenzi, A., Chies, J., Adamatti, D., Silva, L. (2017). Evaluación de la capacidad de detección de fallas en el concreto a través del ensayo ultrasónico. *Revista ALCONPAT*, 7(3), 286-301.
- Mendoza, J. M., Díaz, J. H. (2023). Circular economy in the Latin American cement and concrete industry: a sustainable solution of design, durability, materials, and processes. *Revista ALCONPAT*, 13(3), 328-348.
- Oficina Nacional de Normalización, NC 231 (2002). “Determinación, interpretación y aplicación de la velocidad del pulso ultrasónico en el hormigón”, La Habana, Cuba.
- Oficina Nacional de Normalización, NC 248 (2005). “Hormigón endurecido – Determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión”, La Habana, Cuba.
- Oficina Nacional de Normalización, NC 412 (2005). “Guía para la preparación, mezclado, transporte y vertido del hormigón, La Habana, Cuba.
- Oficina Nacional de Normalización, NC 1340 (2020). “Cemento – Especificaciones”, La Habana, Cuba.
- Oficina Nacional de Normalización, NC ISO 1920-2 (2010). “Ensayos al hormigón – Parte 2: Propiedades del hormigón fresco”, La Habana, Cuba.
- Oficina Nacional de Normalización, NC-ISO 1920-3 (2010). “Ensayos al hormigón – Parte 3: Elaboración y curado de probetas para ensayos, La Habana, Cuba.
- Ossorio, A., Lorenzo, R. (2014). Predicción de la vida útil de las estructuras de hormigón armado mediante un modelo de difusión de iones cloruro. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*, 72, 161-172.
- Pérez, Y., Vera, E., Ochoa, R. (2021). Morphological, chemical, and mineralogical characterization of concrete mixtures produced by electric arc furnace slag. *Journal of Physics: Conference Series*, 2046(1), 012035.
- Rashad, M. (2022). Behaviour of slag aggregate in mortar and concrete – A comprehensive overview. *Journal of Building Engineering*, 53, 104536.
- Rea, A. R. (2023). Daño ambiental y economía circular en la explotación de los recursos naturales no renovables. *Revista FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 16(2), 93-103.
- Rojas, M., Otálvaro, I., Pérez, J., Mauricio, H., Ambriz, C. (2021). Uso de las escorias de horno de arco eléctrico (EHA) en la construcción - estado del arte. *Revista UIS Ingenierías*, 20(2), 53-64.
- Socarrás, Y. C., González, L., Álvarez, E., González, M., Roca, E. (2020). Evaluación de la calidad del hormigón en edificaciones construidas con el sistema prefabricado Gran Panel. *Revista Tecnología Química*, 40(2), 264-277.
- Sohail, M., Laurens, S., Deby, F., Balayssac, J., Nuaimi, N. (2021). Electrochemical corrosion parameters for active and passive reinforcing steel in carbonated and sound concrete. *Materials and Corrosion*, 72(12), 1854-1871.
- Villao, R. (2021). Actualidad de las técnicas de análisis de corrosión en estructuras de concreto reforzado. *Journal of Engineering Sciences*, 3(8), 1-10.
- Zhang, Y., Su, R. (2019). Concrete cover delamination model for non-uniform corrosion of reinforcements. *Construction and Building Materials*, 223(2), 329-340.

Editor Asociado: Elia Mercedes Alonso Guzman
Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, 58030, México
elia.alonso@umich.mx



REVISTA TECNICA

DE LA
FACULTAD DE
INGENIERIA
UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

Volumen 47. Año 2024, Edición continua_____

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en diciembre 2024, por el **Fondo Editorial Serbiluz, Universidad del Zulia.** Maracaibo-Venezuela*

www.luz.edu.ve

www.serbi.luz.edu.ve

www.produccioncientificaluz.org