



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v10i2.3841>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Análisis de la escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en la resistencia y resistividad en el hormigón

Analysis of steel slag as a partial substitute for coarse aggregate in resistance and resistivity in hormigón

Análise da escoria de aço como substituição parcial do agregado grueso na resistência e resistividade no hormigón

José Antonio Bravo Alcívar^I

jbravo6551@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0005-5451-9769>

Marcelo Andrés García Gómez^{II}

mgarcia2791@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0006-6536-3760>

Juan Carlos Guerra Mera^{III}

juan.guerra@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-6597-0022>

Correspondencia: jbravo6551@utm.edu.ec

***Recibido:** 01 de abril de 2024 ***Aceptado:** 20 de abril de 2024 *** Publicado:** 21 de mayo de 2024

- I. Estudiante de Ingeniería Civil. Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- II. Estudiante de Ingeniería Civil. Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.
- III. Docente Principal del Departamento de Construcciones Civiles, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.

Análisis de la escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en la resistencia y resistividad en el hormigón

Resumen

La producción industrial del acero genera contaminación y escasez de recursos naturales. Este estudio examina el uso de escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en hormigón, evaluando sus efectos en la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica. La investigación tiene como objetivo analizar el impacto de reemplazar el agregado grueso por escoria de acero en proporciones del 15, 30 y 45% sobre la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica de hormigón con especificaciones de resistencia de 21 MPa. Se adoptó una metodología experimental donde se prepararon mezclas de hormigón con diferentes proporciones de escoria de acero (0, 15, 30, y 45%). Se evaluó la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica en intervalos de 7, 14, 21 y 28 días, utilizando normas ASTM para la preparación y curado de especímenes de hormigón. Los resultados muestran un incremento en la resistencia a la compresión con el aumento de escoria, alcanzando hasta 30,13 MPa en la mezcla con 45% de escoria a los 28 días. Sin embargo, se observó una disminución en la resistividad eléctrica con mayores proporciones de escoria, con valores desde 12,6 K Ω .cm a 10,5 K Ω .cm, indicando una moderada resistencia a la penetración de agentes agresivos. El uso de escoria de acero mejora la resistencia a la compresión mientras reduce la resistividad eléctrica, ofreciendo un enfoque sostenible.

Palabras Claves: Escoria de acero; Hormigón; Resistencia a la compresión; Resistividad eléctrica.

Abstract

The industrial production of steel generates contamination and scarcity of natural resources. This study examines the use of steel slag as a partial substitute for thick, heavy aggregate, evaluating its effects on compression and electrical resistance. The investigation aims to analyze the impact of replacing the thick aggregate with steel slag in proportions of 15, 30 and 45% on the compression resistance and electrical resistance of hormigón with resistance specifications of 21 MPa. An experimental methodology was adopted where hormigón mixtures were prepared with different proportions of steel slag (0, 15, 30, and 45%). Compression resistance and electrical resistivity were evaluated at intervals of 7, 14, 21 and 28 days, using ASTM standards for the preparation and curing of hormone specimens. The results show an increase in compression resistance with an increase in slag, reaching up to 30.13 MPa in the mixture with 45% slag after 28 days. However, a decrease in electrical resistivity was observed with greater proportions of slag, with values ranging from 12.6 K Ω .cm to 10.5 K Ω .cm, indicating moderate resistance to the penetration of aggressive agents. The

Análisis de la escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en la resistencia y resistividad en el hormigón

use of steel slag improves compression resistance while reducing electrical resistance, offering a sustainable approach.

Keywords: Steel slag; Hormigón; Resistance to compression; Electrical resistivity.

Resumo

A produção industrial de aço gera contaminação e escassez de recursos naturais. Este estudo examina o uso de escoria de aço como substituto parcial do agregado pesado em hormigón, avaliando seus efeitos na resistência à compressão e à resistência elétrica. A investigação tem como objetivo analisar o impacto da substituição do agregado grave por escoria de aço em proporções de 15, 30 e 45% sobre a resistência à compressão e à resistência elétrica do hormônio com especificações de resistência de 21 MPa. Foi adotada uma metodologia experimental onde foram preparadas misturas de hormônio com diferentes proporções de escoria de ácido (0, 15, 30, e 45%). A resistência à compressão e a resistência elétrica foram avaliadas em intervalos de 7, 14, 21 e 28 dias, utilizando as normas ASTM para a preparação e cura de amostras de hormônio. Os resultados mostram um incremento na resistência à compressão com o aumento da escoria, alcançando até 30,13 MPa na mistura com 45% de escoria aos 28 dias. No entanto, foi observada uma diminuição na resistência elétrica com maiores proporções de escoria, com valores de 12,6 K Ω .cm a 10,5 K Ω .cm, causando uma resistência moderada à penetração de agentes agressivos. O uso de escoria de aço melhora a resistência e a compressão enquanto reduz a resistência elétrica, oferecendo uma abordagem sustentável.

Palavras-chave: Escoria de aço; Hormigón; Resistência à compressão; Resistência elétrica.

Introducción

La creciente problemática de la contaminación industrial del acero y la escasez de recursos naturales, está conllevando a la elaboración de diferentes productos utilizados en la industria a nivel mundial, esto, plantea desafíos significativos para las futuras generaciones, especialmente en el campo de la ingeniería civil. En este contexto, el presente trabajo se enfoca en analizar la escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en el hormigón, evaluando su impacto en la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica.

El reciclaje de la escoria de acero no es una práctica nueva, lo que se pretende con el presente estudio es, seguir con la línea de investigación y proponer nuevos campos donde se pueda utilizar la escoria,

Análisis de la escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en la resistencia y resistividad en el hormigón

con la finalidad de fomentar el reciclaje de residuos y preservación de los recursos naturales, con la incorporación de materiales poco convencionales como la escoria de acero en las construcciones, ya que el reciclaje de residuos sólidos industriales se debe convertir en un hábito indispensable para la conservación del medio ambiente.

Para llegar a la obtención de esta materia se utilizan diversos procesos metalúrgicos empleados en la fabricación de metales y en cada uno de ellos se producen residuos inevitables denominado “escoria”, en este caso se analizará la escoria de acero que es un subproducto formado durante el proceso de fundición para la obtención del acero.

De acuerdo a datos de la Asociación Mundial del Acero (Worldsteel), 15,7 millones de toneladas de esta escoria siderúrgica surgen como subproducto sólo en Europa, de las cuales 11,5 millones de toneladas se reciclan. Muñoz et al, en su investigación indica que: Se concluye que el uso de residuos de acero es una alternativa para incorporar a la mezcla de hormigón, pues puede reemplazar parcial o totalmente al agregado y lograr la producción de hormigones que no presenten afección en sus propiedades físico-mecánicas; e incluso, en algunos casos, mejorar dichas características. (2021, p.57).

Gencil et al, en sus conclusiones y recomendaciones indica que: En estudios se ha demostrado que, entre las mezclas de hormigón, la mayor resistencia a la compresión se observa cuando se utiliza escoria como agregado grueso y la resistencia a la compresión más baja es observado cuando se utiliza como agregado fino. Las tasas de reemplazo pueden alcanzar hasta un 100% con suficientes propiedades mecánicas. (2021 p.15).

La utilización del acero es una práctica histórica y sostenible, con la evolución de los seres humanos la utilización de este, produce grandes cantidades de escoria siderúrgica, un subproducto de la fundición, como dato referencial tenemos que solo Europa produce anualmente 15.7 millones de toneladas de escoria, reflejando su abundancia y potencial como recurso reciclable. Estudios anteriores han demostrado que la utilización de esta escoria de acero en hormigones lo hacen más resistente, ya que se aprovecha sus propiedades mecánicas, para sustituir áridos gruesos y finos, ilustrando su versatilidad y contribución a la sostenibilidad en la industria de la construcción.

Análisis de la escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en la resistencia y resistividad en el hormigón

En otras investigaciones “Los resultados experimentales indican claramente la posibilidad de utilizar escoria de hierro para preparar HCR en construcciones sin comprometer las propiedades del hormigón, su durabilidad y su rendimiento” (Noufal et al., 2020, p.589).

En la investigación de Kolawole et al, se realizó la evaluación de: Tres tamaños de 5/10, 5/14 y 5/19 mm de agregado grueso, con un contenido de escoria de acero de horno eléctrico en porcentajes de 0, 25, 50, 75 y 100 %; se evaluaron la tracción, absorción de agua, absorción superficial inicial, porosidad, permeabilidad y resistencia al ataque de sulfatos. (p.1).

La escoria de hierro convertida en chatarra se usa como reemplazo parcial del agregado en el hormigón. La escoria de hierro es un subproducto de desecho industrial de la industria siderúrgica. Además, ... el uso de escoria de hierro como reemplazo parcial del agregado grueso y adición de polvo de vidrio al concreto. El porcentaje óptimo de escoria de hierro a reemplazar se determina realizando una prueba de compresión de 28 días en cubos de tamaño 150*150*150 mm con un reemplazo del 5, 10 y 15% de agregados gruesos con escoria de hierro. (Prakash et al., 2021 p.1).

Las investigaciones sobre el uso de escoria de hierro y acero en la construcción de hormigón revelan avances significativos hacia prácticas sostenibles en la ingeniería civil. Estos estudios demuestran que la escoria de hierro, al ser utilizada en hormigón, no solo es factible para obtener hormigón de alta resistencia, sino que también preserva las propiedades clave como durabilidad y rendimiento. Además, el análisis del efecto de diferentes tamaños de agregado grueso y variaciones en los porcentajes de escoria de acero de horno eléctrico muestra impactos positivos en aspectos como la resistencia a la tracción, absorción de agua, y resistencia a sulfatos. Por último, la incorporación de escoria de hierro y polvo de vidrio como reemplazos parciales en el hormigón abre nuevas oportunidades para el reciclaje de subproductos industriales, mejorando la resistencia a la compresión y fomentando la innovación en materiales de construcción sostenibles.

De acuerdo con Tomalá et al, en su análisis indica que: La creciente eliminación de escoria no solo ocupa espacio de terreno, sino que también desperdicia recursos que pueden ser reutilizados y que potencialmente pueden tener un impacto en el medio ambiente debido a la contaminación del agua, el aire y el suelo producto de la liberación de metales y elementos químicos que pueden causar problemas ambientales. (p.2).

Análisis de la escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en la resistencia y resistividad en el hormigón

Desde el punto de vista de Lai et al, mencionan que “los resultados revelaron que las proporciones óptimas de reemplazo de agregados gruesos y finos fueron del 50 y 30%, respectivamente. Con estas proporciones, la resistencia a la compresión y la microestructura del hormigón en edades posteriores podrían mejorarse significativamente” (p.1).

La innovación en la construcción de hormigones, resalta la creciente necesidad de métodos de construcción sostenibles que minimicen la contaminación y maximicen la eficiencia. La incorporación de materiales reciclados, como la escoria de acero, no solo mejora las propiedades mecánicas del hormigón, sino que también fomenta la protección ambiental. Este enfoque integral demuestra la importancia del reciclaje de residuos como escombros y escoria de acero en la producción de hormigón, reduciendo la acumulación en vertederos, mitigando el impacto ambiental y un paso significativo hacia prácticas de construcción más responsables.

La pérdida temprana de durabilidad generalmente es causada por la selección inadecuada de materiales, el incumplimiento de las normas establecidas, las incorrectas dosificaciones, la poca evaluación del entorno, entre otros (Guerra et al.; 2023, p.5). Fiallos et al 2024 sostiene que, una selección adecuada de la relación a/c, más un diseño de hormigón apropiado en función de los requisitos específicos de resistencia y resistividad superficial, es decisivo para lograr índices de durabilidad. Además, varios autores (Solórzano et al 2024; Guerra 2023; Quito et al 2022), indican que la medida de resistividad eléctrica (RE), es una opción sencilla y práctica que permite valorar la durabilidad del hormigón desde la etapa de elaboración, hasta la de curado y endurecimiento.

La viabilidad de usar escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en el hormigón, más un adecuado diseño de mezcla con especial énfasis en su impacto en la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica, y en base de prolongar la durabilidad de las estructuras, incluyendo materiales pocos utilizados en el campo de la construcción de hormigones, como lo es la escoria de acero, puede influir en las propiedades mecánicas y eléctricas del hormigón, proporcionando una perspectiva sustentable y eficiente en el tiempo, considerando la reutilización de residuos industriales en el ámbito de la ingeniería civil.

Para la realización del presente estudio, se utilizó materiales provenientes de varios sectores del país, la escoria de acero como sustitución del agregado grueso (Guayas), agregado grueso (Manabí),

Análisis de la escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en la resistencia y resistividad en el hormigón

agregado fino (Santo Domingo de los Tsáchilas) y cemento Selvalegre (Imbabura). El presente artículo tiene como objetivo principal analizar el efecto de la sustitución de agregado grueso por la escoria de acero, en proporciones de 0, 15, 30 y 45%, para evaluar propiedades como, la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica superficial de un hormigón de resistencia característica especificada de 21 MPa y a compresión media requerida de 29,4 MPa.

Materiales y Metodología.

Los materiales utilizados en esta investigación fueron: el agregado fino, el cual proviene de la cantera de Santo Domingo; agregado grueso de tamaño de 1/2", de la cantera de Portoviejo-Manabí; se utilizó la escoria de acero, residuo no peligroso, que proviene de una fábrica de la provincia del Guayas. Dichos residuos se obtienen de lo que se generan de la fundición del reciclaje de la chatarra, que son los desperdicios de hierro acumulados. Cabe mencionar que la muestra que se obtuvo tenía diferentes tamaños (figura 1), para lo cual se realizó el respectivo tamizado tal como se indica en la figura 2.



Figura 1. Escoria.



Figura 2. Escoria tamizada.

En el diseño de mezcla del hormigón, la escoria de acero, reemplazó parcialmente al agregado grueso, en porcentaje de 0, 15, 30 y 45%. Respecto al cemento, se utilizó la marca SELVALEGRE, que es un cemento portland puzolánico, tipo IP, diseñado para construcciones de hormigón en general, el mismo que cumple con los requerimientos de la norma NTE INEN 490 (Norma Técnica Ecuatoriana) y ASTM C 595.

Análisis de la escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en la resistencia y resistividad en el hormigón

Se estableció una metodología que implicó el análisis de los componentes del hormigón, con especial atención en el agregado grueso y la escoria de acero, una comprensión de cómo la escoria de acero puede variar la estructura del hormigón, brindando así nuevos elementos que se pudieran implementar en el diseño de mezclas de hormigón.

El diseño de mezcla se realizó en base al método ACI 211.1, el cual se basa en una relación agua/cemento fijado de acuerdo a la resistencia mecánica que se desea alcanzar a los 28 días. En este estudio se trabajó para una resistencia a la compresión de 21 MPa a los 28 días con una relación a/c de 0,55.

La parte experimental de la investigación, se la realizó con un total de 48 especímenes, como se indica en la figura 3, que para un mejor control se los rotulo en la parte lateral; obtenidos en moldes de 4 x 8 pulgadas, en base a las normas ASTM C39, C192, C470, con el propósito de realizar ensayos de resistencia a la compresión y resistividad eléctrica superficial del hormigón.



Figura 3. Especímenes de hormigón parte experimental.

Los 48 especímenes se dividieron en cuatro grupos, basados en la dosificación inicial y los porcentajes propuestos: 15, 30 y 45%; asignando 12 especímenes a cada grupo. A la mezcla de hormigón fresca se determinó el asentamiento mediante el cono de Abrahms para que se mantenga entre 7.5 y 12.5 cm (ASTM C143/C143M - 15a, 2015), para una consistencia del hormigón media. Antes de utilizar los moldes, se les aplicó aceite, luego se procedió a llenar los moldes con hormigón en tres capas, dando 25 golpes por cada capa. Paso seguido, se realizó la compactación con una varilla durante unos

Análisis de la escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en la resistencia y resistividad en el hormigón

minutos para evitar huecos o burbujas de aire. Pasado 24 horas, los especímenes fueron desencofrados y curados en una piscina en agua a temperatura $23^{\circ}\text{C} +2$.

Resistencia a la compresión.

Esta propiedad del hormigón en estado endurecido, se evaluó en intervalos a los 7, 14, 21 y 28 días, destinando tres especímenes por grupo en cada intervalo de tiempo. Los ensayos de resistencia a la compresión, fueron llevados a cabo según la norma técnica ASTM C-39. Las muestras cilíndricas de 100 x 200 mm fueron medidas, pesadas y ensayadas en los días previstos de curado. Los experimentos se realizaron en una máquina con una capacidad de 3.000 kN, de Marca Controls (italiana).

Resistividad eléctrica superficial.

Otro de los ensayos de esta investigación, fue la resistividad eléctrica superficial en los especímenes de hormigón. Para efectuar las mediciones de resistividad, se utilizó el equipo Giatec Surf™, un dispositivo canadiense de alta precisión diseñado para análisis en laboratorio; el cual cumple con los requisitos de AASHTO TP95 y es capaz de evaluar la permeabilidad del hormigón a iones cloruro, un factor crítico para la durabilidad de estructuras. Para la etapa experimental utilizamos el siguiente esquema o codificación. DE (Diseño estándar 21MPa) - E (Escoria de acero %). Basándose en la dosificación especificada para 1 m³ de hormigón. Se determinaron las cantidades exactas requeridas del material cementante, agregados gruesos y finos, escoria, agua, en función del volumen total requerido para 48 especímenes de 100 x 200 mm.

Resultados y discusión.

Resistencia a la compresión

Las características de resistencia de las mezclas del hormigón, se han calculado tomando diferentes porcentajes (0, 15, 30 y 45%) de escoria de acero como sustitución parcial del agregado grueso (Figura 4).

Análisis de la escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en la resistencia y resistividad en el hormigón



Figura 4. Especímenes de hormigón ensayados.

Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los 7, 14, 21 y 28 días de curado se compararon con el hormigón estándar para analizar la resistencia a la compresión tal y como se puede observar en la tabla 1. Los datos experimentales proporcionados muestran cómo la resistencia a la compresión evoluciona con el tiempo, específicamente a los 7, 14, 21 y 28 días para diferentes proporciones de sustitución (0, 15, 30 y 45%).

Tabla 1. Resultados ensayo de resistencia a la compresión según los diseños.

Diseño	Series	Total	Fc (MPa) (7días)	Fc (MPa) (14 días)	Fc (MPa) (21 días)	Fc (MPa) (28 días)
DE 0%	12	48	14,28	17,76	18,98	21,83
E 15%	12		19,50	25,52	25,58	26,82
E 30 %	12		19,89	25,55	26,18	27,49
E 45 %	12		20,07	25,91	28,58	30,13

Según los resultados de las pruebas, la resistencia a la compresión tiende a aumentar en todas las proporciones. A medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de escoria de acero, la resistencia a la compresión aumenta. Todos los diseños cumplen con la resistencia característica especificada de 21 MPa a los 28 días.

En la sustitución del 45%, este diseño muestra el mayor aumento en resistencia, especialmente a los 28 días, con valor 30,13 MPa, cumpliendo con la resistencia característica específica y la resistencia promedio requerida.

Análisis de la escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en la resistencia y resistividad en el hormigón

La mejora en la resistencia a la compresión puede atribuirse a varios factores inherentes a las propiedades de la escoria de acero tales como la actividad puzolánica y la mejora en la interfaz pasta-agregado. Los resultados experimentales sugieren que la sustitución de un porcentaje del agregado grueso por escoria de acero no solo es viable, sino que mejora significativamente la resistencia a la compresión del hormigón. Estos hallazgos pueden contribuir a la valorización de residuos industriales y a la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón, presentando una solución sostenible para la industria de la construcción.

Resistividad eléctrica superficial

En la tabla 2, los resultados indican una disminución en la resistividad eléctrica a medida que aumenta el porcentaje de escoria de acero, todos los diseños de mezclas presentan una resistividad eléctrica entre el rango desde 10,5 a 12.6 KΩ.cm en 28 días, alcanzando un estado moderado de penetración de agentes agresivos según la norma ASTHOP-TP-95-2011.

Tabla 2. Resultados de ensayo de resistividad eléctrica.

Diseños	Total de muestras	Series de tres muestras	Resistividad eléctrica (KΩ.cm)			
			7 días	14 días	21 días	28 días
Estándar	12	R1-4	6,9	7,4	9,4	12,4
		R5-8	6,5	7,3	9,4	12,9
		R9-12	6,2	7,5	9,1	12,7
		Promedio	6,5	7,4	9,3	12,6
15%	12	R13-16	5,4	6,3	7,9	12,3
		R17-20	5,9	5,8	8,3	12,4
		R21-24	5,5	6,2	7,8	11,9
		Promedio	5,6	6,1	8,0	12,2
30%	12	R25-28	4,6	5,6	7,7	10,9
		R29-32	4,6	5,3	7,3	11,3
		R33-36	4,9	5,8	7,4	11,6
		Promedio	4,7	5,6	7,5	11,3

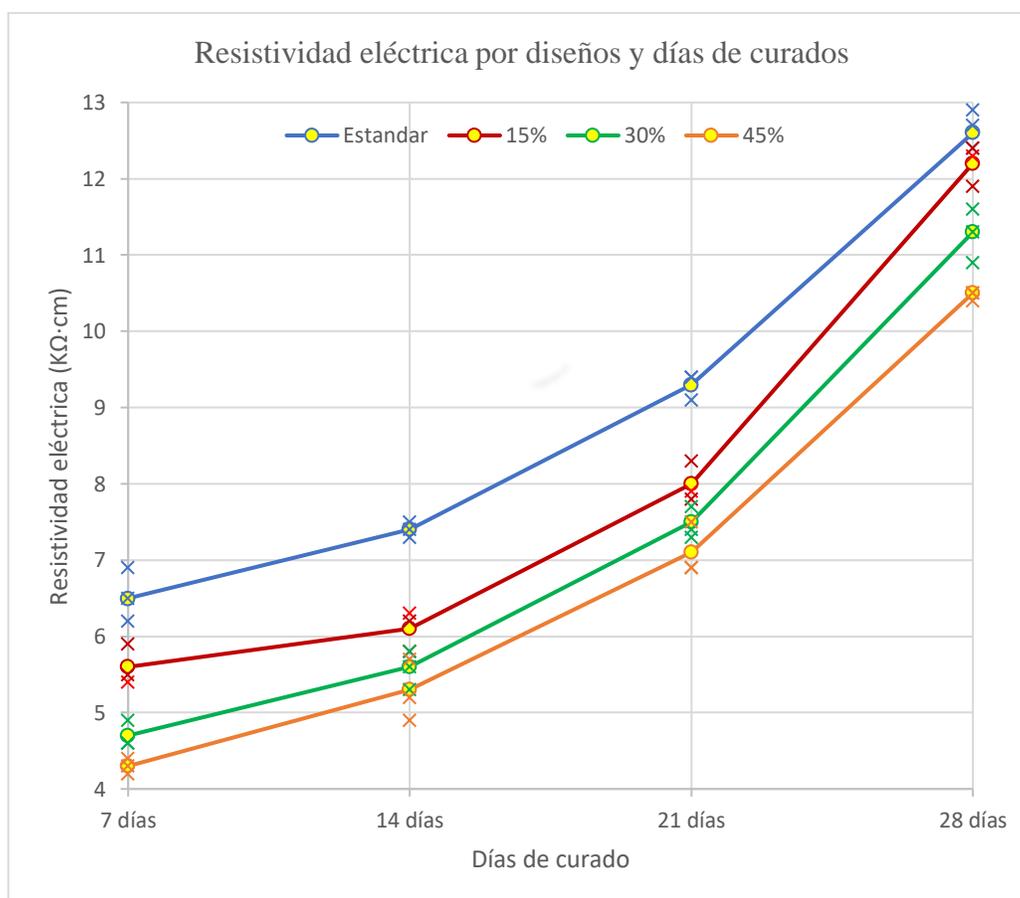
Análisis de la escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en la resistencia y resistividad en el hormigón

45%	12	R37-40	4,3	5,2	6,9	10,5
		R41-44	4,4	5,7	6,9	10,4
		R45-48	4,2	4,9	7,5	10,5
		Promedio	4,3	5,3	7,1	10,5

La tendencia de disminución en la resistividad eléctrica con un aumento en la proporción de escoria puede ser atribuida a la conductividad de la escoria, esta puede contener componentes metálicos que incrementan la conductividad del hormigón, reduciendo así la resistividad eléctrica.

En la figura 5, se observan variaciones significativas en la resistividad eléctrica a lo largo del tiempo de curado para diferentes proporciones de escoria de acero. Los datos reflejan cómo la resistividad eléctrica evoluciona desde los 7 hasta los 28 días en mezclas con 0, 15, 30, y 45% de escoria.

Figura 5. Resultados de resistividad eléctrica por diseños y días de curados.



Análisis de la escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en la resistencia y resistividad en el hormigón

Resistencia a la compresión y resistividad eléctrica

De los resultados obtenidos en los ensayos realizados a los cuatros diseños de mezclas, que se muestran en la tabla 3, existe una correlación entre la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica. Considerando proporciones de sustitución de 0, 15, 30 y 45%, evaluando su efecto sobre un hormigón con una resistencia característica especificada de 21 MPa y una resistencia a compresión media requerida de 29,4 MPa.

Tabla 3. Resultados resistencia a la compresión y resistividad eléctrica.

Diseños	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistividad eléctrica (KΩ.cm)
DE	21,83	12,6
E15	26,82	12,2
E30	27,49	11,3
E45	30,13	10,5

Según la normativa ASTHOP-TP-95-2011, los rangos de resistividad eléctrica entre 10 a 15 KΩ.cm son considerados moderados, lo cual es un parámetro importante para la evaluación de la durabilidad del hormigón en contextos de exposición a la agresividad del ambiente.

Los resultados sugieren que la escoria de acero mejora la resistencia a la compresión del hormigón, lo que puede ser beneficioso para aplicaciones estructurales donde se requiere alta resistencia. Sin embargo, la disminución observada con mayores proporciones de escoria podría estar relacionada con la conductividad intrínseca de los componentes metálicos de la escoria.

El diseño con sustitución de 45% de escoria, presenta la mayor resistencia con 30,13 MPa, superando ampliamente la resistencia media requerida y la especificada y un valor de 10,5 KΩ.cm el cual es considerado dentro del rango de moderada penetración de agentes agresivos, se la considera como un diseño ideal.

Conclusiones

Con base de los resultados obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Análisis de la escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en la resistencia y resistividad en el hormigón

La incorporación de escoria de acero en el hormigón muestra una mejora significativa en la resistencia a la compresión, especialmente a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución. Los diseños con 15, 30 y 45% de escoria alcanzan resistencias superiores a la especificación inicial de 21 MPa, destacando el diseño con 45% que logra una resistencia de 30,13 MPa.

A medida que se aumenta el porcentaje de escoria de acero, se observa una disminución en la resistividad eléctrica. Esta tendencia podría estar relacionada con la mayor conductividad de la escoria debido a la presencia de metales.

Se resalta la posibilidad de innovar en el campo de los materiales de construcción utilizando residuos industriales como la escoria de acero. Esto no solo mejora las propiedades del hormigón, sino que también abre nuevas vías para explorar en la ingeniería de materiales, con el objetivo de desarrollar soluciones más eficientes y respetuosas con el medio ambiente.

Referencias

- Fiallos Lezcano, J., Rodríguez Veliz, M., & Guerra Mera, J. (2024). Incidencia de la relación agua cemento en la resistividad del hormigón. *Polo del Conocimiento*, 9(2), 710-724. doi: <https://doi.org/10.23857/pc.v9i2.6551>
- Gencil, O., Karadag, O., & Hulusi, O. (2021). Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review, *Construction and Building Materials*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821005432>
- Guerra-Mera, J. C.-M.-V.-C. (2023). Estado del arte sobre durabilidad de estructuras de hormigón armado en perfiles costeros. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología E Investigación.*, 6(11), 2-20. <https://doi.org/10.46296/ig.v6i11.0080>.
- Guerra Mera, J. C. . (2023). ESTUDIO DEL DESEMPEÑO POR DURABILIDAD DEL HORMIGÓN EN UNA ZONA DEL PERFIL COSTERO DE MANABÍ, ECUADOR. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 54(1), 238-241. Recuperado a partir de <https://revista.cnic.edu.cu/index.php/RevQuim/article/view/4092>
- Kolawole J. T., Babafemi A. J., Paul S. C., A. Plessis, “Performance of concrete containing Nigerian electric arc furnace steel slag aggregate towards sustainable production”, *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 25, pp. e00174, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00174>.

Análisis de la escoria de acero como sustituto parcial del agregado grueso en la resistencia y resistividad en el hormigón

- Lai, M. H., Zou, J., Yao, B., Ho, J. C. M., Zhuang, X., & Wang, Q. (2021). Improving mechanical behavior and microstructure of concrete by using BOF steel slag aggregate. *Construction and Building Materials*, 277, 122269.
- Muñoz-Pérez, S.P., Cabrera-Alcántara, A.L., Delgado- Bravo, C.C., & Renilla-Lau, P.A. (2021). Comportamiento físico-mecánico del hormigón adicionando residuos de acero: una revisión literaria. *Revista UIS Ingenierías*.
- Noufal E. R., Kasthurba A. K., Sudhakumar J., Manju U., “Assessment of concrete properties with iron slag as a fine aggregate replacement”, *Advances in Concrete Construction*, vol. 9, no. 6, pp. 589-596, 2020, doi: <https://doi.org/10.12989/acc.2020.9.6.589>.
- Prakash, A., Swaminathen, A.N., Ramu, A., & Chaitanya, B... (2021). Assessment of strength and durability parameters for concrete with partial replacement of coarse aggregates by iron slag and glass powder as an additive. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1126.
- Quito-Solórzano, L. M., Macías-Salazar, K. E., & Guerra-Mera, J. C. (2022). Ceniza del bagazo de caña de azúcar para mejorar la resistividad y resistencia del hormigón. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología E Investigación*. ISSN: 2737-6249., 5(10 Ed. esp.), 2-18. <https://doi.org/10.46296/ig.v5i10edesep.0070>
- Solórzano Pinargote, A., Zambrano Gutierrez, A., & Guerra Mera, J. (2024). Características de dos agregados finos que influyen en la resistividad del hormigón. *Polo del Conocimiento*, 9(1), 1813-1829. doi: <http://dx.doi.org/10.23857/pc.v9i1.6466>
- Tomalá Palma, O. J., & Pozo Reyes, J. Y. (2022). Diseño de hormigones con cemento portland de resistencias $F'c = 210, 240$ Y 280 kg/cm^2 con agregado grueso de escoria de acero de alto horno (Bachelor's thesis, La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2022.)
- Worldsteel, Asociación Mundial del Acero, Anuario estadístico del acero 2019: versión concisa Bélgica, Bruselas, 2019)