

Evaluación de las propiedades mecánicas del concreto adicionado con residuo de granalla

Evaluation of the mechanical properties of concrete with added shot blasting waste

SANTIAGO ESTEBAN-RISSO¹ - LUIS HERNÁNDEZ-FONSECA² - RAY PEÑA-PARDO³ - SEBASTIÁN GONZÁLEZ-OLARTE⁴ - KEVIN TAMI-TORRES⁵

1. Estudiante del Programa de Ingeniería Civil. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Estudiante del Programa de Ingeniería Civil. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
3. Estudiante del Programa de Ingeniería Civil. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
4. Estudiante del Programa de Ingeniería Civil. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
5. Magíster en Ingeniería Civil. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0370-334X>.

santiago.risso@mail.escuelaing.edu.co - luis.hernandez-f@mail.escuelaing.edu.co - ray.pena@mail.escuelaing.edu.co - sebastian.gonzalez-o@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 05/08/2024 Aceptado: 15/09/2024

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

La creciente demanda de proyectos de infraestructura sostenible ha impulsado la búsqueda de opciones para mitigar el impacto ambiental generado por la industria de la construcción. En este sentido, se reconoce que la producción de cemento es uno de los procesos de mayor generación de gases de efecto invernadero (GEI). Así mismo, buscando reducir la proporción de cemento en mezclas de concreto, se evaluó el potencial del polvo de granalla, un residuo de la industria metalúrgica, como sustituto parcial del cemento en mezclas de concreto. Para este efecto, se ejecutó un programa experimental en el que se incorporaron la elaboración y el ensayo de especímenes, al igual que la recopilación y el procesamiento de datos posteriores.

Adicionalmente, se evaluaron muestras control, así como cuatro proporciones de remplazo (2,5 %, 5,0 % y 7,5 %), valorando tanto propiedades mecánicas como de durabilidad. De acuerdo con los resultados obtenidos, hubo mejoras significativas en la resistencia a la compresión, tracción y flexión en muestras adicionadas, especialmente con remplazos de 2,5 % y 5,0 % de polvo de granalla. A 28 días de curado, las mezclas con 2,5 % de sustitución alcanzaron un incremento del 50,7 % en resistencia a la compresión y redujeron la permeabilidad a los iones cloruro, lo que indica una mejora en la durabilidad del concreto. Por otra parte, a pesar de que un 7,5 % de sustitución mostró mejoras menos pronunciadas, representa una opción más sostenible al reintroducir mayores cantidades de residuo industrial.

En este estudio se resalta la importancia de utilizar residuos industriales como la granalla para mejorar la sostenibilidad de la construcción, ya que así se disminuye la huella de carbono y se promueve la economía circular en la industria del concreto.

Palabras claves: cemento, sostenibilidad, polvo de granalla, propiedades mecánicas, durabilidad.

Abstract

The growing demand for sustainable infrastructure projects has prompted the search for alternatives to mitigate the environmental impact generated by the construction industry. In this sense, cement production is recognized as one of the processes with the highest greenhouse gas emissions. In order to reduce the proportion of cement in concrete mixes, this study evaluated the potential of shot blasting dust, a waste product of the metallurgical industry, as a partial substitute for cement in concrete mixes. To this effect, an experimental program was executed that incorporated the preparation and testing of specimens, as well as the subsequent collection and processing of data.

Additionally, control samples were evaluated, as well as four replacement proportions (2.5 %, 5.0 %, and 7.5 %), evaluating both mechanical and durability properties. The results showed significant improvements in compressive, tensile and flexural strength in the added samples, especially with 2.5 % and 5.0 % shot blasting dust replacements. At 28 days of curing, the mixes with 2.5 % replacement achieved a 50.7 %

increase in compressive strength and reduced permeability to chloride ions, indicating an improvement in concrete durability. On the other hand, although 7.5 % substitution showed less pronounced improvements, it represents a more sustainable option by reintroducing greater amounts of industrial waste.

This study highlights the importance of using industrial waste such as shot blasting to improve the sustainability of construction, decreasing the carbon footprint and promoting the circular economy in the concrete industry.

Keywords: cement, sustainability, shot blasting dust, mechanical properties, durability.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de proyectos de infraestructura ha impulsado la búsqueda de diseños más eficientes y sostenibles, lo que ha significado nuevos desafíos en técnicas constructivas, en el uso de materiales y en sus impactos ambientales. En este orden de ideas, se tiene como reto la disminución de la huella de carbono relacionada con este material, considerando que el concreto es uno de los materiales de uso más extensivo y reconociendo que la producción de cemento es una actividad que se destaca en la producción de gases de efecto invernadero (GEI). Para tal fin, el empleo de materiales cementantes suplementarios ha significado una alternativa para mezclas más sostenibles, buscando que incidan de manera positiva en las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto, y mitigando, al mismo tiempo, su impacto ecológico.

Igualmente, se reconoce que la industria metalúrgica es una de las más importantes en el ámbito internacional, pero también que es responsable de grandes cantidades de residuos, muchos de los cuales no se gestionan en forma adecuada; por ejemplo, del proceso de granallado de superficies metálicas se produce un polvo que normalmente se considera como un desecho. Este polvo de granalla, de acuerdo con la composición de las esferas empleadas, puede tener un alto contenido de aluminosilicatos.

En estudios previos se ha evaluado la incidencia del polvo de granalla en el concreto como remplazo de agregado fino, y se han hallado resultados favorables en remplazos cercanos al 30 % (Ramírez y Vergara, 2013). Sin embargo, haciendo hincapié nuevamente en que el componente más contaminante del concreto es el cemento, se planteó un programa experimental, cuyo objetivo fue evaluar la incidencia del polvo de granalla, como remplazo parcial del cemento, en las propiedades mecánicas y de durabilidad de mezclas de concreto.

Este proyecto se desarrolló en el marco de las líneas de investigación de comportamiento de materiales de construcción y de construcción sostenible, dos de las cuatro líneas en las que el Grupo de Investigación en Estructuras y Materiales (Gimeci), de la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, concentra sus esfuerzos.

INTRODUCTION

The growing demand for infrastructure projects has driven the search for more efficient and sustainable designs, leading to new challenges in construction techniques, material use, and their environmental impacts. In this context, reducing the carbon footprint associated with concrete is a key challenge, considering that concrete is one of the most widely used materials and acknowledging that cement production is a major contributor to greenhouse gas (GHG) emissions. To address this, the use of supplementary cementitious materials has emerged as an alternative for more sustainable mixes, aiming to positively affect the mechanical properties and durability of concrete while simultaneously mitigating its ecological impact.

Furthermore, the metallurgical industry is recognized as one of the most important globally, but it is also responsible for large amounts of waste, much of which is not properly managed. For example, the process of shot blasting metal surfaces produces dust that is typically considered waste. According to the composition of the spheres used, this shot dust may have a high content of aluminosilicates.

Previous studies have evaluated the impact of shot dust in concrete as a replacement for fine aggregates, with favorable results found when replacing up to 30% (Ramírez & Vergara, 2013). However, emphasizing again that the most polluting component of concrete is cement, an experimental program was designed with the objective of assessing the impact of shot dust as a partial replacement for cement in the mechanical properties and durability of concrete mixes.

This project was developed within the research lines of construction material behavior and sustainable construction, two of the four research lines focused on by the Research Group on Structures and Materials (Gimeci) at the Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

A partir de la revisión de la bibliografía, se decidió evaluar la incidencia de la granalla en distintas proporciones de remplazo en peso de cemento, considerando el enfoque de sostenibilidad de este trabajo:

- 0,0 % - control.
- 2,5 %.
- 5,0 %.
- 7,5 %.

Como consecuencia de esto, se elaboraron especímenes de concreto de ensayo, sobre los que se midieron distintos parámetros. Se hace énfasis en que, durante el proceso de mezcla, la granalla se agregó en seco al cemento, antes de mezclarse con el resto de los materiales de mezcla.

Las propiedades evaluadas, la normativa referente y las edades de ensayo se resumen a continuación. Cabe anotar que el número de especímenes evaluados por edad y por porcentaje de remplazo se identifican entre paréntesis.

- **Resistencia a la compresión (ASTM C39-24)**
Cilindros de 100 × 200 mm
4 (2), 14 (2) y 28 (2) días.
- Resistencia a la tracción indirecta (ASTM C49617)
Cilindros de 100 × 200 mm
28 (2) días.
- **Resistencia a la flexión (ASTM C78-22)**
Vigas de 150 × 150 × 500 mm
14 (2) y 28 (2) días.
- **Resistencia a la penetración de iones cloruro (ASTM C1202-22)**
Discos de 100 × 50 mm
14 (4) y 28 (4) días.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Una vez finalizada la etapa experimental, se procedió con el análisis de dispersión de los resultados, para así reportar los datos estadísticamente representativos.

Los resultados obtenidos de cada ensayo, así como su correspondiente análisis, se detallan en las secciones posteriores.

Resistencia a la compresión (f_c)

Los valores de resistencia a la compresión agrupados por porcentaje de remplazo, obtenidos en cada edad de ensayo, se evidencian a renglón seguido (tabla 1):

Tabla 1
Resultados de resistencia a la compresión

Edad (días)	Resistencia a la compresión f_c (MPa)			
	Porcentaje de remplazo			
	Control	2,5 %	5,0 %	7,5 %
4	4,66	6,66	6,16	4,41
14	11,19	17,20	17,10	13,61
28	14,05	21,17	20,67	16,61

Fuente: Elaboración propia.

Inicialmente, es posible evidenciar que, entre todos los especímenes, las mayores resistencias se lograron en forma consistente por las muestras con un 2,5 % de remplazo de cemento por residuo de granalla. De manera paralela, no se evidenció gran variación entre los datos de 2,5 % con respecto a los resultados arrojados por las muestras con un remplazo del 5,0 %. Por último, se presenta que, a una edad de 28 días, la menor resistencia correspondió a las muestras patrón, registrando valores por debajo de las muestras con porcentaje de sustitución.

La variación de la resistencia de cada mezcla con porcentaje de sustitución, en relación con la mezcla control, para cada una de las edades de ensayo, se evidencia a renglón seguido (tabla 2):

Tabla 2
Variación de la resistencia a la compresión

Edad (días)	Variación de la resistencia a la compresión			
	Porcentaje de remplazo			
	Control	2,5 %	5,0 %	7,5 %
4	–	43,0 %	32,3 %	-5,26 %
14	–	53,6 %	52,8 %	21,7 %
28	–	50,7 %	47,1 %	18,2 %

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla se pueden apreciar mejoras significativas en la respuesta mecánica de las mezclas con adición de polvo de granalla, respecto a los especímenes de la mezcla control. Nuevamente, se evidencia que los porcentajes de remplazo de 2,5 % y 5,0 % son óptimos en este ámbito, mientras que un remplazo de 7,5 %, aun cuando también denota un aumento en la resistencia, no es tan significativo en comparación con las otras mezclas.

Finalmente, se denota el comportamiento de ganancia de resistencia en el tiempo de las tipologías de espécimen ensayadas (gráfico 1).

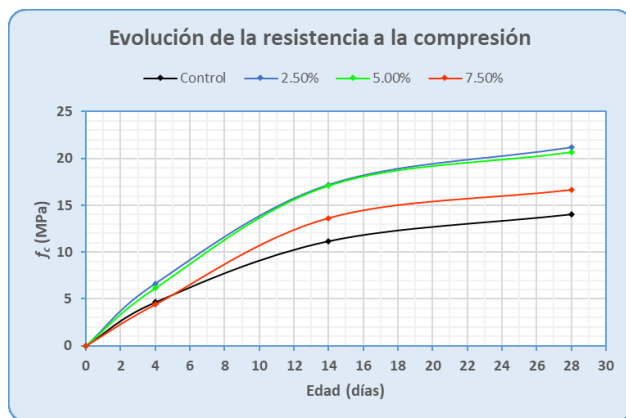


Gráfico 1. Evolución de la resistencia a la compresión.

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico se observa la similitud de comportamiento entre los especímenes con porcentajes de remplazo de 2,5 % y 5,0 %. De igual manera, se evidencia la diferencia entre las resistencias a 28 días, denotando la incidencia positiva de bajas dosificaciones de polvo de granalla como remplazo de cemento.

Resistencia a la tracción indirecta

A continuación, se ilustra el modo de falla típico en especímenes sometidos al ensayo de tracción indirecta (imagen 1). Por otra parte, los resultados obtenidos de este ensayo para cada porcentaje de sustitución de polvo de granalla, en 28 días, se describen más adelante (tabla 3):

De modo similar a lo evidenciado en compresión, se muestra que la resistencia a la tracción obtenida en muestras adicionadas fue mayor que aquella correspondiente a los especímenes control (tabla 3). Igualmente, los aumentos más significativos fueron otra vez los relacionados con las mezclas de 2,5 % y 5,0 % de rem-

plazo de polvo de granalla, ya que lograron mejoras de 35,9 % y 46,3 % con respecto a la muestra patrón, correspondientemente. Por otra parte, la mezcla con 7,5 % de remplazo alcanzó un aumento en su resistencia a tracción de 27,9 % en relación con la muestra control.

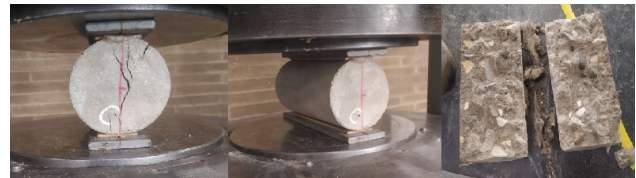


Imagen 1. Realización de un ensayo de tracción indirecta.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3
Resultados de resistencia a la tracción

Resistencia a la tracción indirecta f_t (MPa)				
Edad (días)	Porcentaje de remplazo			
	Control	2,5 %	5,0 %	7,5 %
28	1,62	2,20	2,37	2,08

Fuente: Elaboración propia.

Por último, se evidenció que, a 28 días, todos los valores de resistencia a la tracción se encuentran en un rango entre un 10 % y 13 % del valor de resistencia a la compresión correspondiente, lo que implica que la adición mantiene la relación que se conoce convencionalmente.

Resistencia a la flexión (MR)

En la imagen siguiente (imagen 2) se puede ver el modo de falla de un ensayo de flexión (que muestra una falla en el tercio central), mientras que en la tabla que aparece a continuación (tabla 4) se resumen los resultados de esta propiedad en las muestras ensayadas.



Imagen 2. Realización de un ensayo de módulo de rotura.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4
Resultados de resistencia a la flexión

Edad (días)	Resistencia a la flexión (MR) (MPa)			
	Porcentaje de remplazo			
	Control	2,5 %	5,0 %	7,5 %
14	1,97	2,38	2,31	2,26
28	2,29	2,69	2,75	2,56

Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia otra vez que todas las muestras adicionales presentaron un mejor comportamiento mecánico que las muestras control, al tiempo que se identificó una mejora más significativa en los especímenes con adición de 2,5 % y 5,0 %. Incluso, a 28 días, se observó que el mejor comportamiento fue aquel dado por la mezcla con un 5,0 % de remplazo cemento por polvo de granalla.

A renglón seguido, se puede apreciar la variación de la resistencia a flexión de cada dosificación de polvo de granalla en relación con las muestras de control (tabla 5).

Tabla 5
Variación de la resistencia a la flexión

Edad (días)	Variación de la resistencia a la flexión			
	Porcentaje de remplazo			
	Control	2,5 %	5,0 %	7,5 %
14	–	20,8 %	17,5 %	14,9 %
28	–	17,2 %	20,0 %	11,7 %

Fuente: Elaboración propia.

En este aspecto, se señala que si bien se obtuvieron resultados positivos, la incidencia de la granalla no fue suficiente como para que la resistencia a la flexión alcanzara valores comparables con los de resistencia a la compresión; por tanto, se considera que el diseño de estructuras nuevas elaboradas con concreto reforzado adicionado con polvo de granalla puede seguir realizándose con las metodologías de diseño convencionales.

Finalmente, se ilustra el proceso de ganancia de resistencia a la flexión en el tiempo. Se observa que, de manera similar al proceso de ganancia de resistencia a la compresión, con una velocidad alta en los primeros días y una desaceleración a medida que se aproximan los 28 días, el fraguado se ha efectuado en una gran cantidad de partículas (gráfico 2).

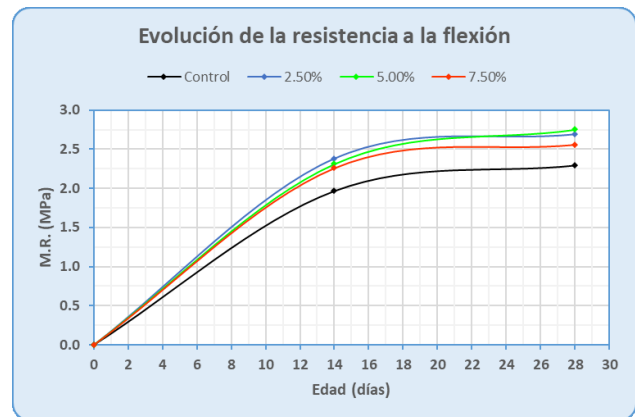


Gráfico 2. Evolución de la resistencia a la flexión.

Fuente: Elaboración propia.

Resistencia a la penetración de iones cloruro

El ensayo de resistencia a cloruros tiene un enfoque de durabilidad. Físicamente, la finura de las partículas que conforman una mezcla tiene una incidencia sobre la permeabilidad del material ante agentes externos, razón por la cual en este ensayo se buscó valorar el efecto del polvo de granalla en la durabilidad del concreto.

Inicialmente, se resalta que el parámetro exportado del ensayo corresponde al flujo de carga total obtenido en un periodo de seis horas de ensayo, medido en culombios. En este sentido, una muestra que evidencia una mayor cantidad de corriente significa que es más permeable, o que tiene una menor resistencia a la penetración de cloruros; por el contrario, una mayor resistencia a cloruros se ve representada por una menor cantidad de iones que se desplazaron a través de la muestra.

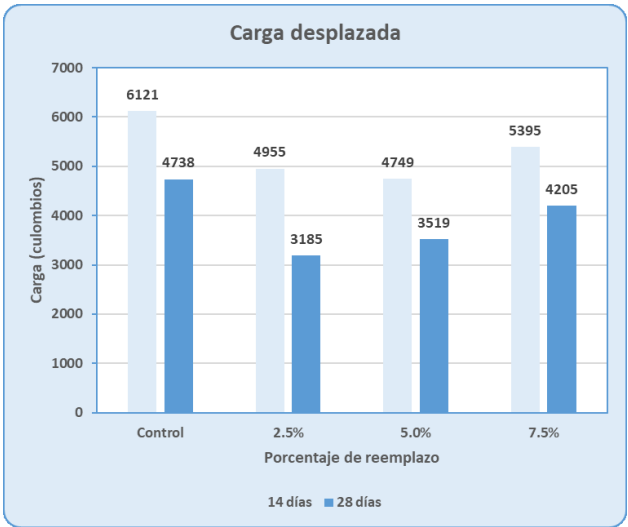
El montaje requerido para la ejecución de este ensayo se ilustra a continuación (imagen 3). Por otra parte, los resultados obtenidos de las dosificaciones evaluadas y en los tiempos de ensayo previstos se agrupan más adelante (tabla 6).



Imagen 3. Realización de un ensayo de penetración de iones cloruro.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6
Resultados de penetración de iones cloruro



Fuente: Elaboración propia.

Para una mejor interpretación de resultados, ASTM C1202-22 incorpora en su apéndice una indicación cualitativa que relaciona la penetrabilidad de la muestra al ion cloruro con la carga desplazada (tabla 7).

Tabla 7
Penetrabilidad del ion cloruro de acuerdo con la carga desplazada

Carga desplazada (culombios)	Penetrabilidad del ion cloruro
>4000	Alta
2000-4000	Moderada
1000-2000	Baja
100-1000	Muy baja
<100	Insignificante

Fuente: ASTM, 2022.

En este sentido, para los resultados obtenidos, se obtiene la categorización mostrada seguidamente (tabla 8).

Se evidencia que a 14 días todas las muestras presentaron una alta penetrabilidad de iones cloruro; esto es normal debido a que el proceso de curado todavía es efectivo, por lo que los espacios intersticiales aún permiten un alto flujo de carga para todas las dosificaciones de polvo de granalla.

Por otra parte, a 28 días se observó que las muestras control y con 7,5 % de remplazo mantuvieron una alta

penetrabilidad del ion cloruro; sin embargo, las muestras con 2,5 % y 5,0 % redujeron su penetrabilidad de alta a moderada. Esto indica que la adición tuvo una incidencia positiva sobre la durabilidad del concreto en dichas dosificaciones.

Tabla 8
Resultados de penetración de iones cloruro

Ensayo de cloruros			
Porcentaje de remplazo	Edad (días)	Carga (culombios)	Penetrabilidad
Control	14	6121	Alta
	28	4738	Alta
2,5 %	14	4955	Alta
	28	3185	Moderada
5,0 %	14	4749	Alta
	28	3519	Moderada
7,5 %	14	5395	Alta
	28	4205	Alta

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las mezclas de concreto que contenían 2,5 % y 5,0 % de sustitución de cemento por residuo de granalla mostraron un incremento significativo en la resistencia a la compresión en comparación con las muestras de control, durante tiempos de curado de 4, 14 y 28 días. En particular, la mezcla con 2,5 % de sustitución mostró el mayor aumento de resistencia después de 28 días, y obtuvo un valor 50,7 % mayor que el registrado en la muestra control, lo que sugiere un impacto positivo del polvo de granalla en las propiedades mecánicas del concreto.

Así mismo, a 28 días, todas las mezclas que contenían residuo de granalla lograron una mayor resistencia a la tracción indirecta, en comparación con las muestras control. Para esta propiedad, nuevamente las mejoras más significativas se evidenciaron para los porcentajes de remplazo de 2,5 % y 5,0 %, y este último fue el que reveló un mejor comportamiento. Estos resultados indican que, a pesar de que no se pueda emplear granalla como elemento que confiere altas características a tracción del concreto, sí aumentan el margen de seguridad

en el cumplimiento de estados límite de servicio, como formación de fisuras o desarrollo de deflexiones.

De manera similar, los resultados de módulo de rotura también mostraron un mejor comportamiento en los especímenes con un 2,5 % y 5,0 % de residuo, y consiguieron a 28 días valores de resistencia 17,2 % y 20,0 % mayores que los de la muestra control, respectivamente. Sin embargo, a pesar de que la mezcla con un 7,5 % de remplazo también mejoró la resistencia, el incremento fue menos significativo que el evidenciado con los otros porcentajes de sustitución.

Igualmente, la prueba de penetración de iones cloruro demostró que remplazar el cemento con un bajo porcentaje de residuo de granalla (2,5 % a 5,0 %) reduce la permeabilidad del concreto, lo que puede significar una mejora en la resistencia a la corrosión en ambientes agresivos. Este conocimiento es muy importante para el ámbito de la durabilidad y vida útil de las estructuras de concreto reforzado.

Por lo general, entre las mezclas con residuo, aquellas con un 7,5 % de sustitución fueron las que evidenciaron una mejora menos significativa respecto a las muestras con 2,5 % y 5,0 % de sustitución. De todos modos, a los 28 días de curado, las muestras con esta proporción de adición (7,5 %) registraron un incremento en la resistencia a la compresión en un 18 %, en la resistencia a la tracción en un 28 % y en el módulo de rotura en un 12 %, en relación con las muestras control.

Vale la pena anotar que si bien no resultó ser el porcentaje de sustitución más adecuado en términos de propiedades mecánicas, su empleo representa la mayor sostenibilidad, en tanto que contiene una mayor cantidad de residuo de granalla y una menor cantidad de cemento.

Para posteriores investigaciones, se recomienda contrastar los beneficios mecánicos brindados por usar bajos porcentajes de remplazo de cemento por polvo de granalla, con la ventaja ambiental que significa reintroducir a la cadena productiva un residuo de la industria del acero como remplazo parcial de un material como

el cemento. Este análisis permitiría obtener un rango de porcentajes de sustitución óptimo.

Al incorporar el polvo de granalla en la mezcla, se promueven la gestión y la reutilización sostenible de los residuos industriales, evitando su acumulación, reduciendo la necesidad de espacios para su disposición y aportando a una economía circular. Además, la adición del polvo de granalla ayuda a disminuir la cantidad de cemento necesario en las mezclas de concreto, lo que a su vez reduce la huella de carbono relacionada con su producción.

REFERENCIAS

- Abrasivos y Maquinaria, S.A. (s.f.). Silicato de aluminio (arena para chorrear). <http://www.abrasivosymaquinaria.com/silicato-de-aluminio> [citado el 23 de julio del 2012].
- Andrew, R. M. (2018). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 10(1), 195-217.
- Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., & Bahadori, A. (2013). Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 51, 142-161.
- Berridi, I. (2008). *Análisis de la influencia de residuos metalúrgicos como áridos en las propiedades del hormigón*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Environmental Protection Agency (2000). *Guide to cleaner technologies: alternatives to chlorinated solvents for cleaning and degreasing*. EPA.
- European Commission (2001). *Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference document on best available techniques in the iron and steel industry*.
- Muñoz-Pérez, S. P. (2022). Comportamiento físico-mecánico del hormigón adicionando residuos de acero: una revisión literaria. *Revista UIS Ingenierías*, 21(1), 57-72.
- Ramírez, D. E., y Vergara, M. F. (2013). *Evaluación de la resistencia mecánica del concreto modificado con residuo de granalla de silicato de aluminio* [tesis de pregrado en Ingeniería Química]. Universidad de Cartagena.
- Ramírez, N. (s.f.). Concepto para la disposición del residuo de granalla de silicato de aluminio.
- Serrano, M. F. (2011). *Concreto preparado con residuos industriales: resultado de alianza empresa-universidad*. *Revista Educación en Ingeniería*, 6(11), 1-11.
- World Steel Association (2021). *Steel's contribution to a low carbon future and climate resilient societies*. WSA.
- Yellishetty, M., Ranjith, P. G., Tharumarajah, A., & Bhosale, S. (2010). Life cycle assessment in the minerals and metals sector: a critical review of selected issues and challenges. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(8), 876-890.