

Utilización de áridos siderúrgicos en hormigones de protección radiológica para aplicaciones estructurales

Use of siderurgical aggregates in radiological shielding concretes for structural applications

Pablo Tamayo Castañeda^a, Carlos Thomas García^a, Jokin rico arenal^c, Sara Pérez Avelleira^d

^a Doctor en Ingeniería Civil. Universidad de Cantabria-LADICIM. Investigador. tamayop@unican.com

^b Doctor en Físicas. Universidad de Cantabria-LADICIM. Profesor titular. thomasc@unican.com

^c Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. INGECID. Director Ejecutivo-CEO. jokin.rico@ingecid.es

^d Física. INGECID. Departamento de Ingeniería Nuclear. sara.perez@ingecid.es

RESUMEN

La recuperación de subproductos industriales, como áridos de escoria de hornos de arco eléctrico, permite reducir el consumo de áridos naturales en la construcción sostenible. Este estudio evalúa cuatro dosificaciones de hormigón con áridos de caliza, siderúrgicos y magnetita, enfocándose en propiedades físico-mecánicas y capacidad de protección radiológica. Se validaron los resultados mediante simulaciones, analizando el impacto de la relación agua/cemento y el contenido de cemento en el blindaje contra radiación. Los hormigones con áridos siderúrgicos demostraron una protección intermedia entre caliza y magnetita, siendo efectivos para estructuras de protección radiológica, debido a su alta densidad.

ABSTRACT

The recovery of industrial by-products, such as steel slag from electric arc furnaces, allows reducing the consumption of natural aggregates in sustainable construction. This study evaluates four concrete mixes with limestone, siderurgical and magnetite aggregates, focusing on physical-mechanical properties and radiological shielding capacity. The results were validated through simulations, analyzing the impact of the water/cement ratio and cement content on radiation shielding. Concretes with siderurgical aggregates demonstrated intermediate protection between limestone and magnetite, being effective for radiological protection structures, due mainly to their high density.

PALABRAS CLAVE: Materiales, sostenibilidad y ciclo de vida de las estructuras.

KEYWORDS: Materials, sustainability and life cycle of structures.

1. Introducción

La búsqueda de nuevos materiales y la optimización del diseño de estructuras de blindaje son dos objetivos principales en la ciencia y tecnología de los materiales de blindaje nuclear. El material más utilizado para este fin es el hormigón debido a su bajo coste, facilidad de instalación, propiedades mecánicas y capacidad

de atenuar tanto la radiación gamma como la neutrónica [1]. Por otro lado, las políticas actuales, por ejemplo en el marco de la Unión Europea, están enfocadas a utilizar materiales de construcción más sostenibles que se asocien a menores emisiones de CO₂. En el caso de los áridos siderúrgicos (SA) esta reducción puede

llegar al 35% [2]. De la combinación de estos dos conceptos surge la idea de diseñar hormigones con SA con el fin de obtener eco-hormigones con un blindaje eficaz contra la radiación.

Los dos tipos principales de radiación ionizante son la radiación gamma y la radiación neutrónica. La atenuación de los rayos gamma (fotones) a través de un material se produce de forma exponencial con el espesor del absorbedor. Esta atenuación sigue la Ley de Lambert y es altamente dependiente de la densidad del material de blindaje. En general, se puede considerar que un aumento del 25% en la densidad proporciona al hormigón un aumento del coeficiente de atenuación (μ) de alrededor del 10% [3]. Los hormigones de alta densidad utilizan áridos con densidades superiores a 3000 kg/m³ [4].

La atenuación de los neutrones rápidos se puede estimar con la expresión de Kernel de Albert–Welton y la sección eficaz ΣR ($\Sigma R = \Sigma \text{scattering} + \Sigma \text{absorption}$). ΣR es la probabilidad de que un neutrón rápido sufra una interacción que lo retire del grupo de radiación penetrante [5]. El hormigón está compuesto por núcleos ligeros (gran $\Sigma \text{scattering}$) que aumentan la probabilidad de una interacción de tipo scattering elástico, termalizando los neutrones rápidos [6]. Los dos elementos naturales con mayor sección eficaz de dispersión de neutrones son H y C (un orden de magnitud menor que el primero), por lo que grandes cantidades de cemento (CEM) proporcionarán una mayor cantidad de productos a base de C e hidratados. Una vez termalizados, los materiales con gran sección eficaz de absorción ($\Sigma \text{absorption}$) son los encargados de capturar los neutrones térmicos por captura radiativa. En el hormigón de blindaje se pueden utilizar áridos naturales con gran $\Sigma \text{absorption}$ (a base de boro) como la colemanita [7], con la gran desventaja de que muestran un carácter retardante de la hidratación de los CEM [8].

Además, existen estudios en la literatura que utilizan secuencias de cálculo como Monte Carlo

N-Particle Transport (MCNP) o MAVRIC [9] que permiten modelar las interacciones de los materiales con la radiación, facilitando el seguimiento de todas las partículas y energías. Estas simulaciones permiten cotejar resultados experimentales y, una vez validados, desarrollar modelos complejos.

El uso del SA en el hormigón con fines radiológicos es algo nuevo y una aplicación potencial que necesita ser explorada. Recientemente, algunos autores comprobaron la respuesta a la radiación gamma utilizando una fuente de ¹³⁷Cs [10,11], pero hay que caracterizar más fuentes y respuestas neutrónicas. De nuevo, aunque existen numerosos estudios que demuestran la influencia de la relación a/c en las propiedades de fractura y las características mecánicas de los hormigones [12], apenas hay trabajos de investigación que analicen el efecto sobre su capacidad de blindaje.

Este estudio evalúa la viabilidad técnica del uso de AS en hormigones destinados a la protección radiológica. Se analizaron dosificaciones con diferentes relaciones agua/cemento (0.39, 0.43, 0.47, 0.51 y 0.55) y contenidos de cemento (260, 300, 340, 380 y 420 kg/m³), incorporando AS, caliza y magnetita como áridos. Se determinaron propiedades físico-mecánicas, como densidad y resistencia a compresión, y se evaluó la capacidad de atenuación de radiaciones gamma y de neutrones. Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa para el diseño de hormigones más sostenibles y eficaces en aplicaciones de blindaje radiológico.

2. Metodología

2.1 Materiales y dosificaciones

Se utilizaron áridos calizos en las siguientes fracciones granulométricas: 12-18 mm (LC1), 6-12 mm (LC2) y 0-6 mm (LS1). Los áridos siderúrgicos empleados corresponden a tamaños de 8-16 mm (SC1), 4-8 mm (SC2), 0-4 mm (SS1) y 0-2 mm (SS2). Por último, los áridos de

magnetita utilizados incluyen las fracciones 0-20 mm (MC1) y 0-8 mm (MS1).

Las cuatro dosificaciones de hormigón (Table 1) se diseñaron mediante el método de Fuller, utilizando la misma cantidad de agua, cemento (CEM I 52.5R [44]), aditivo superplastificante y volumen de áridos para garantizar una comparación homogénea. Se prepararon una

dosificación de referencia con áridos calizos (LLC), dos dosificaciones con áridos siderúrgicos, una complementada con arena caliza (SLC) y otra con arena de árido siderúrgico triturado de 0-2 mm (SSC) para suplir la falta de finos, y una dosificación con áridos de magnetita (MMC).

Table 1. Dosificaciones de hormigón (kg/m³).

Component	LLC	SLC	SSC	MMC
CEM	340	340	340	340
Water	160	160	160	160
LC1	284	-	-	-
LC2	662	-	-	-
LS1	946	776	-	-
SC1	-	722	722	-
SC2	-	484	484	-
SS1	-	443	443	-
SS2	-	-	1155	-
MC1	-	-	-	1662
MS1	-	-	-	1801
Superplasticizer	3.4	3.4	3.4	3.4
w/c	0.47	0.47	0.47	0.47

2.2 Ensayos físico-mecánicos

Las propiedades físicas del hormigón endurecido a 28 días se evaluaron según la norma UNE-EN 12390-7 para las densidades relativa, aparente y saturada con superficie seca, y la norma UNE 83980 para la porosidad accesible y el coeficiente de absorción de agua. Las propiedades mecánicas a 28 días se determinaron de acuerdo con la norma EN 12390-3 para la resistencia a compresión, la norma EN 12390-13 para el módulo elástico secante en compresión mediante el método B, y la norma EN 12390-6 para la resistencia a tracción indirecta por compresión.

2.3 Simulaciones

Las simulaciones de este estudio tuvieron como objetivo comparar los resultados experimentales y, una vez validados, analizar las variables más

críticas en la protección radiológica. Para ello, se replicó la geometría del laboratorio utilizando las secuencias de cálculo MAVRIC® (SCALE 6.2.3), considerando la composición química y la densidad de cada dosificación como datos de entrada. El análisis de variables se realizó modificando la relación agua/cemento entre 0.39 y 0.55, y el contenido de cemento entre 260 y 420 kg/m³, tomando como referencia los valores de 0.47 y 340 kg/m³ utilizados en las cuatro dosificaciones. Las simulaciones, realizadas en vacío con un detector puntual de eficiencia del 100%, abarcaron nueve proporciones de dosificación y cinco espesores por cada tipo de hormigón, resultando en un total de 288 simulaciones para radiación gamma y neutrones. Para la radiación gamma, se obtuvieron flujos de fotones en un rango de energía de 20 keV a 20 MeV, determinándose el coeficiente de atenuación lineal (μ) mediante ajuste lineal de espesores y flujos. En el caso de

los neutrones, los flujos se analizaron en un rango de 0.0005 eV a 20 MeV, obteniendo el factor de atenuación (I/I_0) para espesores de hasta 15 cm, calculando el parámetro Σ mediante ajuste exponencial y el factor de acumulación según la ecuación correspondiente.

2.4 Ensayos de blindaje radiológico

El dispositivo experimental se utilizó para validar los resultados obtenidos en las simulaciones, y viceversa. Esta validación se realizó inicialmente con la dosificación SSC, a partir de la cual se propuso un programa experimental que incluye diversas cantidades de cemento y relaciones agua/cemento. La capacidad de atenuación frente a la radiación gamma se evaluó colocando placas de hormigón de 100x100 mm² de distintos espesores entre una fuente de radiación gamma y un detector. Se

midió la intensidad del flujo que atraviesa el material y se comparó con la intensidad en ausencia de hormigón. A partir de la Ley de Lambert, se determinó el coeficiente de atenuación lineal (μ) utilizando la expresión $I = I_0 e^{-\mu l}$ donde I_0 es la intensidad inicial, I la intensidad remanente y l el espesor de la placa. Para caracterizar una amplia gama de energías de fotones, se emplearon diversas fuentes de radiación gamma, incluyendo los isótopos: ¹³⁷Cs (662 keV and $7.2 \cdot 10^5$ Bq), ⁶⁰Co (1170, 1330 keV and $3.4 \cdot 10^4$ Bq), ²²Na (1280 keV and $2.6 \cdot 10^5$ Bq) and ²⁰⁷Bi (570 keV, 1064 keV and $4.9 \cdot 10^4$ Bq). Para la detección, se utilizó un detector centelleador de NaI(Tl) con una eficiencia del 76-100% en el rango de energías evaluado, conectado a un analizador multicanal (MCA) y a un ordenador. La configuración experimental se muestra en la Figure 1 (izda).

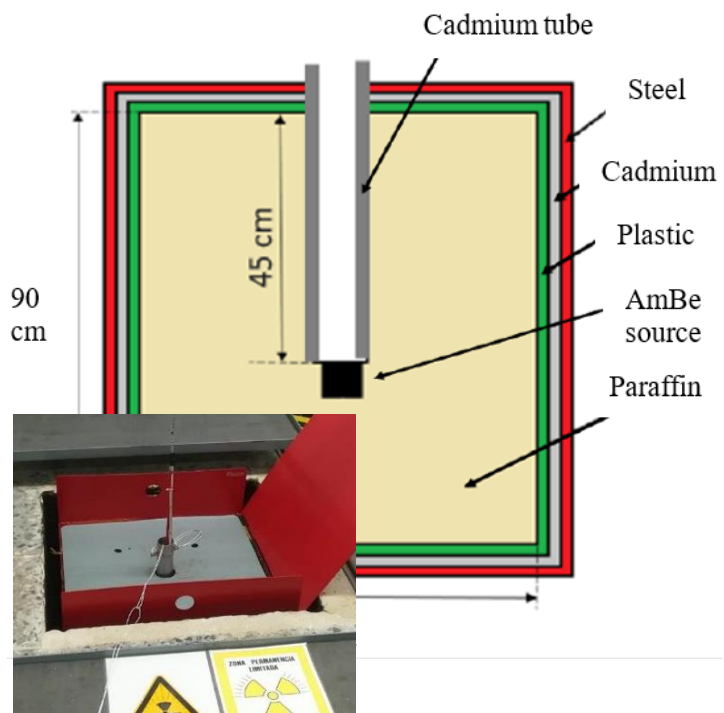
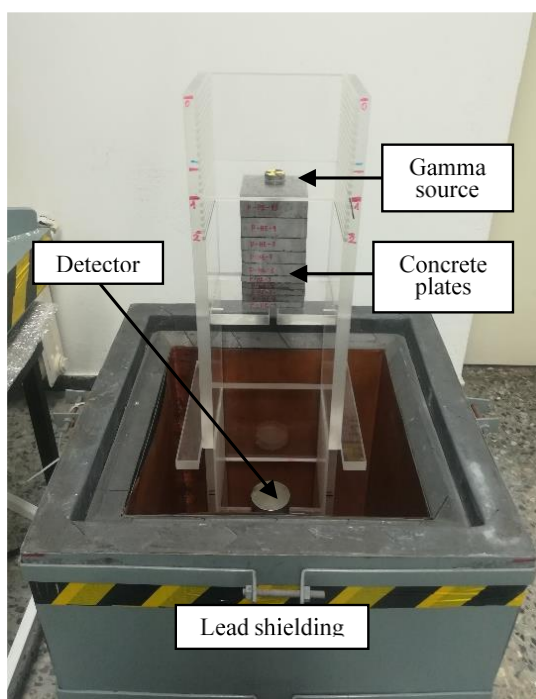


Figure 1. Configuración experimental para los ensayos de blindaje contra radiación gamma (izquierda) y neutrones (derecha).

Para medir la capacidad de atenuación de neutrones, se utilizaron placas cilíndricas de hormigón de 40 mm de diámetro y distintos espesores, con una longitud total de 15 cm (Figure 1), colocadas entre la fuente de neutrones y el detector. A diferencia de los

fotones, la atenuación de neutrones no sigue un comportamiento puramente exponencial, debido a la influencia de los neutrones dispersos a través del blindaje y en el aire antes de alcanzar el detector. Para corregir este efecto, se aplica un factor de acumulación (Δ) que permite calcular

la sección eficaz de neutrones Σ (cm^{-1}) en función del espesor (x), el flujo de neutrones inicial (Φ_0) y el flujo final (Φ), de acuerdo con la expresión: $\Phi(x) = \Phi_0(1 + \Delta(\Sigma x)^2)e^{-\Sigma x}$.

3. Resultados y análisis

3.1 Ensayos físico-mecánicos

La **Table 1** Table 2 presenta las propiedades físicas de las cuatro dosificaciones de hormigón fabricadas, junto con sus desviaciones estándar. Se observa

que la densidad aparente de la dosificación SLC es un 20% mayor en comparación con la dosificación LLC, mientras que en la dosificación SSC este incremento alcanza casi el 30%, y en la dosificación MMC llega al 40%.

La porosidad de las dosificaciones es similar, situándose alrededor del 7%, lo que indica una compactación eficiente en las dosificaciones SLC y SSC. Estos resultados resaltan la importancia del proceso de vibrado, especialmente en hormigones con áridos siderúrgicos, para garantizar una adecuada compactación.

Table 2. Propiedades físicas de las dosificaciones de hormigón.

Mix	Densidad relativa [g/cm^3]	Densidad aparente [g/cm^3]	Densidad SSD [g/cm^3]	Porosidad [% Vol.]	Absorción [% wt.]
LLC	2.34±0.03	2.52±0.03	2.41±0.03	6.97±0.28	2.98±0.14
SLC	2.93±0.02	3.14±0.02	3.05±0.02	6.83±0.16	2.33±0.06
SSC	3.25±0.01	3.47±0.03	3.31±0.02	6.17±0.45	1.90±0.13
MMC	3.93±0.03	4.30±0.02	4.03±0.03	7.72±0.39	1.95±0.12

La forma angular y la rigidez de los áridos siderúrgicos mejoran la calidad de la zona de transición pasta-árido (ITZ) [13], lo que se traduce en una mejora de las propiedades mecánicas del hormigón. Las dosificaciones LLC (referencia) y MMC alcanzaron valores similares de resistencia a compresión, mientras que las dosificaciones SLC y SSC mostraron incrementos del 42% y 75%, respectivamente. El módulo elástico de las cuatro dosificaciones sigue una tendencia similar a la resistencia a compresión, aunque con variaciones menos pronunciadas entre ellas.

3.2 Simulaciones

3.2.1. Efecto de los áridos en el blindaje

Las cuatro dosificaciones iniciales ($340 \text{ kg}/\text{m}^3$ y relación a/c = 0.47) contienen el mismo

volumen de áridos, lo que permite comparar el efecto de cada tipo de árido en su comportamiento. La Figure 2 (izquierda) muestra el coeficiente de atenuación lineal (μ) en función de la energía. En el rango de 1 a 10 MeV, la dosificación SLC presenta un valor de μ un 24% superior a la dosificación de referencia (LLC), mientras que en la dosificación SSC este aumento alcanza el 41%, evidenciando el impacto positivo de la incorporación de áridos siderúrgicos como sustituto del árido natural. Por otro lado, la dosificación MMC muestra un incremento del 71% en comparación con LLC y un 21% respecto a SSC, destacando su potencial para aplicaciones de blindaje radiológico. A partir de los 10 MeV, el coeficiente de atenuación lineal tiende a estabilizarse en todas las dosificaciones.

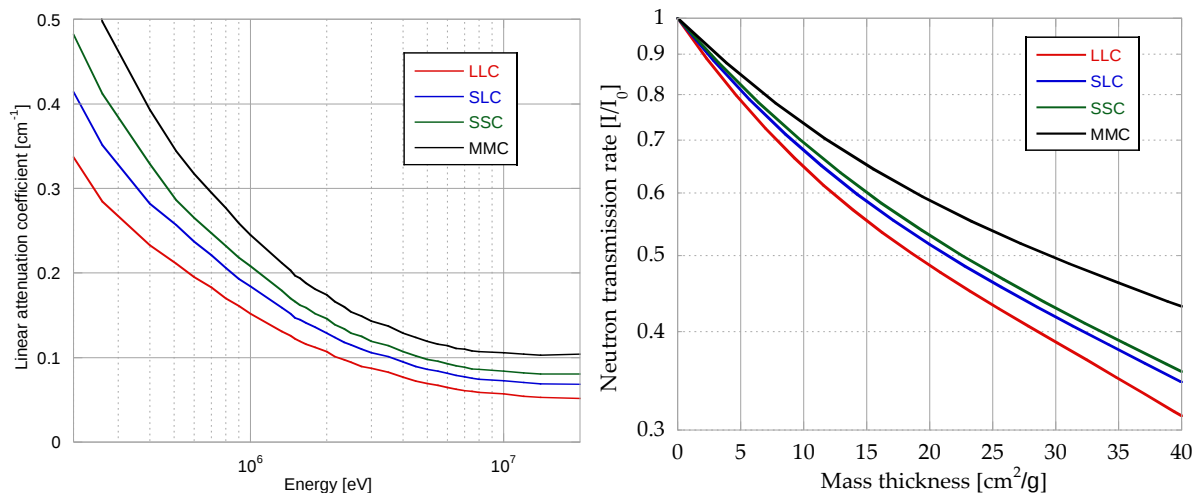


Figure 2. Coeficiente de atenuación lineal (izda) y tasa de transmisión de neutrones (dcha) para los 4 hormigones.

Para ignorar el efecto de la densidad, I/I_0 se representa generalmente como una función de espesor de masa (cm^2/g). En la Figure 2 (derecha), se representa gráficamente esta relación y se puede observar que las dosificaciones con un mayor contenido de elementos ligeros muestran una mejor atenuación de neutrones, mientras que la dosificación con magnetita muestra la peor eficiencia de blindaje.

3.2.2. Efecto de la cantidad de cemento

El cemento (CEM) influye significativamente en el comportamiento

radiológico del hormigón debido a su aporte de hidrógeno en estado hidratado. La Figure 3 (izquierda) muestra la variación del coeficiente de atenuación lineal (μ) en función de la cantidad de CEM, analizando una energía de 1 MeV. A mayor cantidad de CEM, menor μ , indicando una reducción en la efectividad del hormigón para atenuar fotones. La pérdida de μ por cada 100 kg de CEM añadido es del 3.1% en la dosificación LLC, 4.9% en SLC, y alcanza el 5.8% en SSC y MMC, debido a la menor densidad del cemento en comparación con los áridos utilizados.

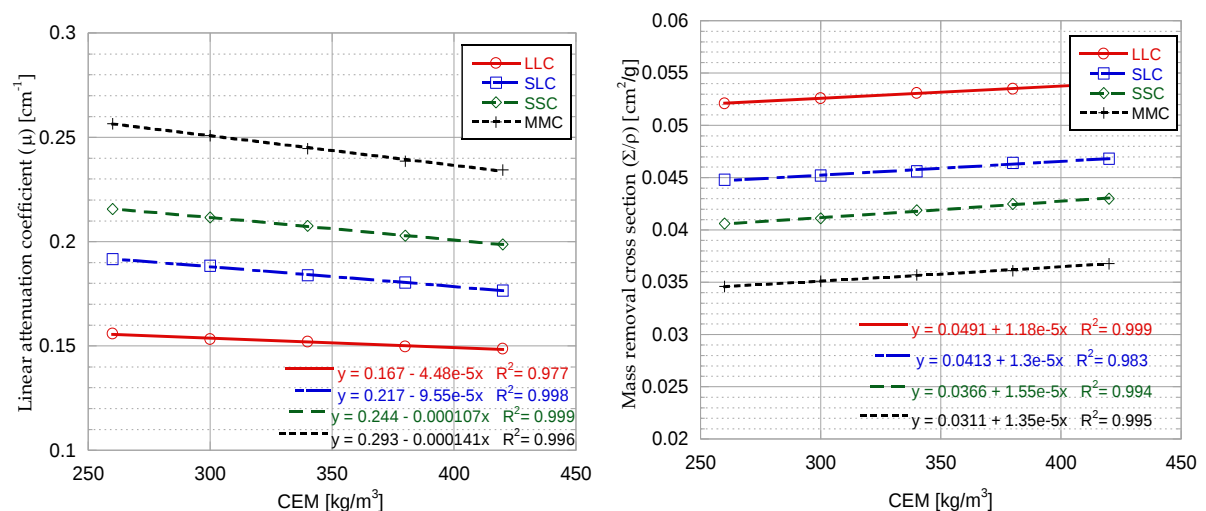


Figure 3. Efecto de la cantidad de cemento en μ Σ_r/ρ .

Para comparar materiales independientemente de su densidad, se emplea la sección eficaz de eliminación másica (Σ/ρ) expresada en cm^2/g . Como se muestra en la Figure 3 (derecha), Σ/ρ aumenta proporcionalmente con el contenido de CEM, con incrementos del 2.3%, 2.8%, 3.7% y 4% por cada 100 kg de CEM en las dosificaciones LLC, SLC, SSC y MMC, respectivamente.

En cuanto a la capacidad de atenuación de neutrones, la dosificación LLC resulta ser la más eficiente, seguida por SLC, con una reducción del 14%, SSC con un 22%, y MMC con un 34%, debido al mayor contenido de elementos ligeros como carbono y oxígeno en las dosificaciones con áridos calizos.

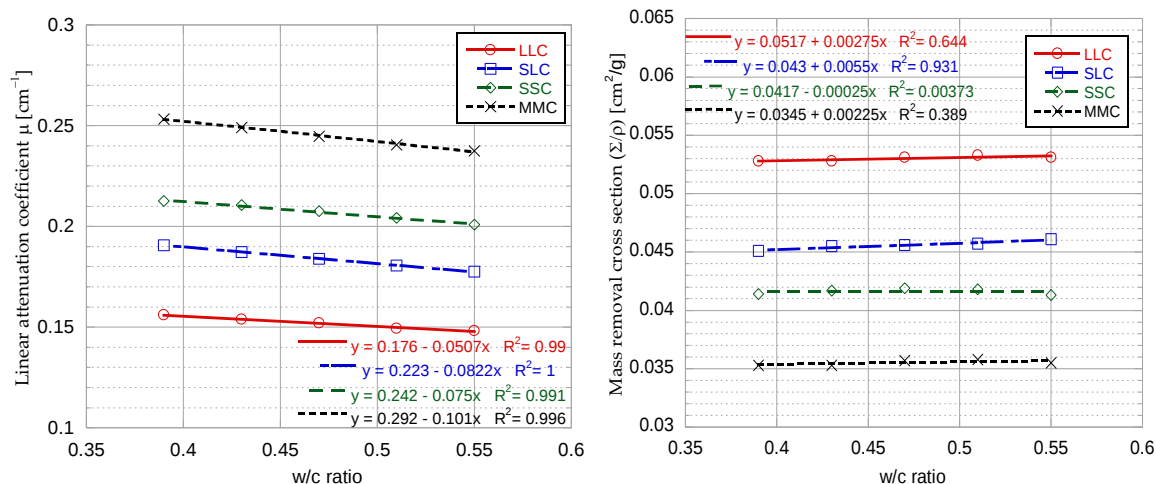


Figure 4. Efecto e la relación a/c en μ y en Σ/ρ .

La Figure 4 (derecha) muestra que la relación Σ/ρ se mantiene constante al variar la relación a/c, ya que la composición química de las dosificaciones no cambia, dado que el agua adicional se evapora. Las dosificaciones con áridos distintos presentan valores de Σ/ρ inferiores en comparación con LLC, con reducciones del 14% en SLC, 21.5% en SSC y 33% en MMC. Esto se debe a la mayor

3.2.3. Efecto de la relación agua/cemento

La Figure 4 (izquierda) muestra que un aumento de 0.1 en la relación a/c reduce el coeficiente de atenuación lineal (μ) en un 3.2% para LLC, 4.3% para SLC, 3.5% para SSC y 3.9% para MMC, debido a la disminución de la densidad por el mayor contenido de agua y la reducción del volumen de cemento y áridos. Comparando las dosificaciones, se observa que, en promedio, μ aumenta en un 17% para SLC, 27% para SSC y 38% para MMC en relación con LLC, destacando el mejor rendimiento de los hormigones de mayor densidad en cualquier relación a/c.

concentración relativa de oxígeno y carbono en las dosificaciones con áridos calizos, así como a las diferencias en el contenido de oxígeno entre las dosificaciones sin áridos calizos (SSC y MMC).

3.3 Ensayos de blindaje radiológico

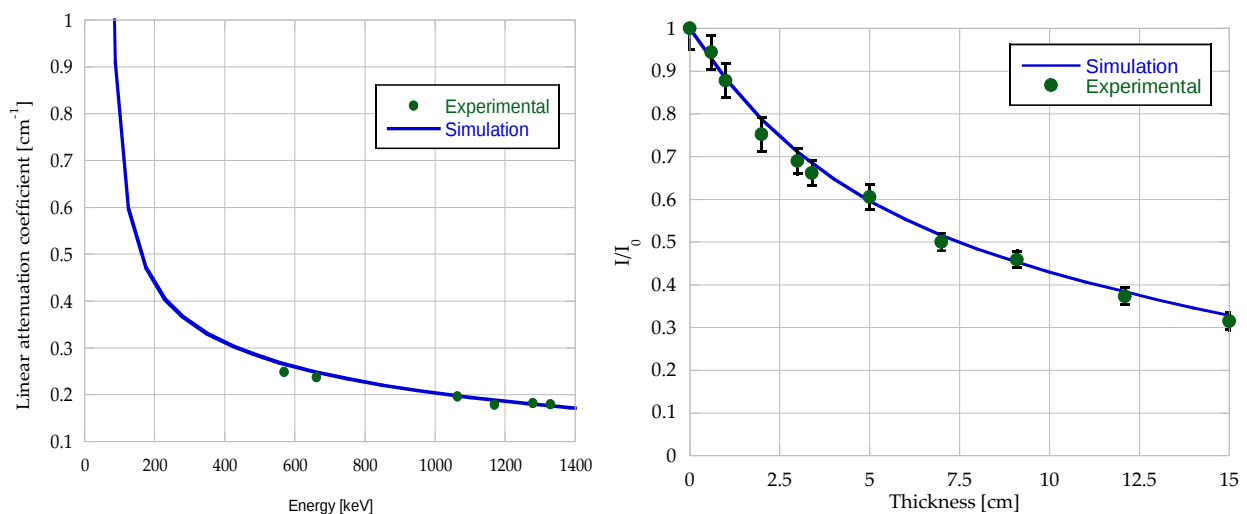


Figure 5. Coeficiente de atenuación lineal (izda) y factor de atenuación de neutrones (dcha) para las simulaciones/ensayos experimentales.

Las diferencias entre las simulaciones y los ensayos experimentales (Figure 5) se deben a la suposición de que el hormigón es un material homogéneo, cuando en realidad factores como la porosidad (6-8%) y la segregación de áridos afectan su capacidad de blindaje. Los ensayos para la dosificación SSC mostraron coeficientes de atenuación lineal entre 0.17 y 0.25 cm⁻¹, con un error medio del 0.44%, similar a estudios previos, mientras que las simulaciones presentaron errores menores. La variación del factor de atenuación de neutrones en función del espesor mostró una dispersión atribuida a la eficiencia del detector, aunque los resultados simulados se mantuvieron dentro del margen de error experimental, validando así el modelo teórico para su aplicación en las demás dosificaciones.

4. Conclusiones

En esta investigación se comparó la respuesta físico-mecánica y la capacidad de blindaje radiológico del hormigón con áridos siderúrgicos frente a dosificaciones con áridos calizos y de magnetita, evaluando el efecto de la variación de la relación agua/cemento y la cantidad de cemento. A partir del análisis de los

resultados, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La rigidez de los áridos siderúrgicos mejoran las propiedades mecánicas en comparación con los áridos calizos y de magnetita. La resistencia a compresión de las dosificaciones SLC y SSC aumentó en un 42% y 75%, respectivamente, en comparación con la dosificación de referencia.
- En términos de capacidad de blindaje, el coeficiente de atenuación lineal (μ) fue un 19%, 28% y 40% superior en las dosificaciones SLC, SSC y MMC, respectivamente, en comparación con la LLC. Sin embargo, la tasa de transmisión de neutrones (I/I_0) presentó una tendencia opuesta a la de μ .
- Se confirmó una buena concordancia entre los resultados de las simulaciones y los ensayos experimentales, tanto para μ como para Σ , mostrando un alto grado de correspondencia con valores de R^2 cercanos a 1.

Estos hallazgos destacan el potencial del uso de áridos siderúrgicos en hormigones destinados a aplicaciones de blindaje radiológico.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido cofinanciada por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (MINECO) en el marco del proyecto RTC-2016-5637-3. La investigación ha sido posible gracias a la colaboración de la empresa INGECID, el departamento LADICIM (Universidad de Cantabria), el Departamento de Física Moderna de la Universidad de Cantabria y las empresas ROCACERO y SIDENOR.

Referencias

- [1] A. El-Sayed Abdo, Calculation of the cross-sections for fast neutrons and gamma-rays in concrete shields, *Ann. Nucl. Energy.* 29 (2002) 1977–1988. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0306-4549\(02\)00019-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0306-4549(02)00019-1).
- [2] F. Faleschini, P. De Marzi, C. Pellegrino, Recycled concrete containing EAF slag: environmental assessment through LCA, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 18 (2014) 1009–1024.
- [3] M.A. González-Ortega, I. Segura, S.H.P. Cavalaro, B. Toralles-Carbonari, A. Aguado, A.C. Andrelo, Radiological protection and mechanical properties of concretes with EAF steel slags, *Constr. Build. Mater.* 51 (2014) 432–438. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.067>.
- [4] E.N. 206-1, Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity, (2008).
- [5] I.I. Bashter, Calculation of radiation attenuation coefficients for shielding concretes, *Ann. Nucl. Energy.* 24 (1997) 1389–1401. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0306-4549\(97\)00003-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0306-4549(97)00003-0).
- [6] M.F. Kaplan, Concrete radiation shielding, (1989).
- [7] Y. Yazar, A. Bayülken, Investigation of neutron shielding efficiency and radioactivity of concrete shields containing colemanite, *J. Nucl. Mater.* 212 (1994) 1720–1723.
- [8] P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, *CONCRETE Microstructure, Properties and Materials*, (2017).
- [9] D.E. Peplow, Monte Carlo shielding analysis capabilities with MAVRIC, *Nucl. Technol.* 174 (2011) 289–313.
- [10] M. Maslehuddin, A.A. Naqvi, M. Ibrahim, Z. Kalakada, Radiation shielding properties of concrete with electric arc furnace slag aggregates and steel shots, *Ann. Nucl. Energy.* 53 (2013) 192–196. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.09.006>.
- [11] A.G. Hassan, H. Elkady, A.S. Faried, M.A. Hassan, M.E. Allam, Evaluation of electric arc furnace slag high strength shielding concrete on exposure to gamma 662 KeV, *Case Stud. Constr. Mater.* 13 (2020) e00416.
- [12] R. Ince, K.E. Alyamaç, Determination of fracture parameters of concrete based on water-cement ratio, (2008).
- [13] I. Sosa, C. Thomas, J.A. Polanco, J. Setién, P. Tamayo, High Performance Self-Compacting Concrete with Electric Arc Furnace Slag Aggregate and Cupola Slag Powder, *Appl. Sci.* 10 (2020) 773.