

ESTADO DEL CONOCIMIENTO SOBRE LA VIABILIDAD DEL USO DE ESCORIAS DE ACERÍA ELÉCTRICA EN HORMIGONES COMPACTADOS A RODILLO

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN INGENIERÍA DE MATERIALES AVANZADOS

Bilbao, febrero 2018

AUTORA: AINHOA LANDABEREA LORENZO

DIRECTOR: JOSÉ TOMÁS SAN JOSÉ LOMBERA

ÍNDICE

<i>Resumen</i>	7
<i>Abstract</i>	7
<i>Agradecimientos / Acknowledgements</i>	7
<i>Apéndice de siglas ordenadas alfabéticamente</i>	8
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Aspectos generales	9
1.2. Objetivos y estructura del trabajo	10
2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	10
2.1. Hormigón Compactado con Rodillo.....	10
2.1.1. Definición	10
2.1.2. Avance histórico	11
2.1.3. Componentes de la mezcla	11
2.1.4. Propiedades.....	15
2.1.5. Producción, transporte y puesta en obra	17
2.1.6. Aplicaciones.....	21
2.1.7. Ventajas frente al hormigón convencional	23
2.2. Escorias siderúrgicas.....	23
2.2.1. Introducción	23
2.2.2. Producción de acero y escorias.....	24
2.2.3. Tipos de escorias provenientes de la fabricación del acero	26
2.2.4. Características	29
2.2.5. Propiedades.....	30
2.3. Escorias de acero de Horno Eléctrico de Arco (EAFS y LFS)	31
2.3.1. Definición	31
2.3.2. Proceso de fabricación del acero y las escorias	32
2.3.3. Volumen de EAFS y LFS generadas.....	35
2.3.4. Composición química y mineralógica.....	36
2.3.5. Características y propiedades	38
2.3.6. Aplicaciones.....	39

3.	MATERIALES RECICLADOS UTILIZADOS EN MORTEROS Y HORMIGONES.....	42
4.	MATERIALES RECICLADOS UTILIZADOS RECIENTEMENTE EN LOS HCR	45
5.	HORMIGONES COMPACTADOS A RODILLO CON ESCORIAS DE ACERÍA ELÉCTRICA	47
5.1.	Pretratamiento de las escorias negras: estabilización volumétrica	47
5.2.	Dosificación de los HCR con escorias de acería eléctrica	48
5.2.1.	Diseño y proporción de la mezcla	48
5.2.2.	Mezclado de los componentes	50
5.3.	Propiedades de los HCR con EAFS y LFS	51
5.3.1.	Densidad y peso unitario.....	51
5.3.2.	Resistencia mecánica	51
5.3.3.	Rigidez	56
5.3.4.	Consistencia y trabajabilidad	57
5.3.5.	Contracción volumétrica	58
5.3.6.	Durabilidad	59
5.4.	Viabilidad del empleo de escorias de acería eléctrica en HCRs	60
6.	CONCLUSIONES	61
7.	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS	62
8.	FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Aspecto (Izda.) y consistencia (Dcha.) del HCR.	10
Figura 2. Comparación entre las dosificaciones utilizadas en HCR vs HC	14
Figura 3. Mezclador de flujo continuo.	17
Figura 4. Mezclador de tambor inclinable	18
Figura 5. Mezclador de tránsito	18
Figura 6. Mezclador de doble eje	19
Figura 7. Colocación (izda.) y extendido (dcha.) del HCR.....	20
Figura 8. Compactación (izda.) y extendido emulsión curado (dcha.) del HCR	20
Figura 9. Alisado de la superficie del HCR	21
Figura 10. Puesta en obra de pavimentos de HCR.....	21
Figura 11. Puesta en obra de presas de HCR	22
Figura 12. Mapa de localización de la producción de acero en España	24
Figura 13. Progresión de la producción mundial de acero bruto desde 1950 hasta 2017.....	25
Figura 14. Producción de acero bruto en España en los últimos 10 años	25
Figura 15. Métodos de producción de acero en España y a nivel mundial.	26
Figura 16. Clasificación de las escorias siderúrgicas según su procedencia	27
Figura 17. Escorias de horno alto (BFS): granuladas, expandidas/peletizadas y enfriadas al aire (de izda. a dcha.)	28
Figura 18. Proceso de fabricación del acero y de las escorias generadas	28
Figura 19. Escorias de la fabricación del acero: BFS, LDS, EAFS y LFS (de izda. a dcha.).	29
Figura 20. Escorias de horno eléctrico de arco: EAFS (izda.) y LFS (dcha.)	32
Figura 21. Esquema y componentes de un HEA	33
Figura 22. Esquema de un Horno Cuchara	34
Figura 23. Proceso de fabricación del HEA.....	34
Figura 24. Representación esquemática del proceso de fabricación del acero en Horno Eléctrico de Arco y posterior refino en Horno Cuchara	35
Figura 25. Escorias de HEA: EAFS (izda.) y LFS (dcha.)	38
Figura 26. Materiales reciclados utilizados en morteros y hormigones como sustitución de los áridos naturales. De izda. a dcha.: cenizas volantes, RCD y NFU troceados.....	44

Figura 27. Materiales reciclados utilizados en morteros y hormigones como sustitución de los áridos naturales. De izda. a dcha.: cenizas de fondo, vidrio reciclado y EAFS.....	44
Figura 28. Materiales reciclados utilizados en morteros y hormigones como adición del cemento: lodos de depuradora de aguas residuales (izda.) y humo de sílice (dcha.).....	45
Figura 29. Relación típica de contenido de humedad-densidad establecida en el método de compactación del suelo.....	50
Figura 30. Representación esquemática (izda.) e imagen SEM (dcha.) de la interfase árido-pasta de cemento.....	52
Figura 31. Interfase árido natural-pasta de cemento VS interfase escoria EAF-pasta de cemento	53
Figura 32. Imagen de la interfase EAFS-pasta de cemento mediante SEM (aumento x1000)	53
Figura 33. Ensayo de resistencia a compresión	54
Figura 34. Ensayo de resistencia a flexión a cuatro puntos.....	55
Figura 35. Ensayo de resistencia a tracción indirecta	55
Figura 36. Procedimiento para realizar el ensayo del módulo de elasticidad del HCR	56
Figura 37. Consistómetro Vebe empleado para evaluar la consistencia de mezclas de HCR en estado fresco.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cementos recomendados para aplicaciones estructurales	12
Tabla 2. Rangos compositivos típicos de escorias de hierro (arrabio) y acero.....	30
Tabla 3. Propiedades físicas de los áridos siderúrgicos vs áridos naturales	31
Tabla 4. Volumen de escorias negras y blancas generadas en España en el año 2017.....	35
Tabla 5. Composición química de las EAFS	36
Tabla 6. Composición mineralógica de las EAFS.....	36
Tabla 7. Composición química de las LFS.....	37
Tabla 8. Composición mineralógica de las LFS.....	37
Tabla 9. Propiedades físico-mecánicas de las EAFS y LFS	39

Resumen

El impacto ambiental generado por la actividad humana ha conducido a la búsqueda de la sostenibilidad a nivel global. Sectores, como la industria del cemento y del hormigón, consumen grandes cantidades de materias primas, además de generar altos impactos ambientales en el planeta. Con lo que sustituir dichas materias por subproductos de otras industrias, como la industria del acero, ayudaría a preservar los recursos naturales, disminuir la contaminación y reducir la demanda en vertederos, impulsando así la sostenibilidad.

En este sentido, se estudia la reutilización de las escorias de acería eléctrica (EAFS + LFS) en hormigones compactados a rodillo, desde el punto de vista del comportamiento mecánico y la durabilidad. Ambas escorias, y en especial la escoria EAF, muestran un amplio potencial de utilización en esta aplicación. Se requieren estudios adicionales que corroboren este asunto.

Abstract

The environmental impact due to human activity has led to the search for global sustainability. Sectors, such as the cement and concrete industry, consume large quantities of raw materials, in addition to generating high environmental impacts on the planet. Therefore, replacing these materials with by-products from other industries, such as the steelmaking industry, would help to preserve natural resources, reduce pollution and reduce landfills, thus promoting sustainability.

In this sense, the reuse of electric steel slag (EAFS + LFS) in roller compacted concretes is studied, from the point of view of mechanical behaviour and durability. Both slags, and especially the EAF slag, show a wide potential for use in this application. Additional studies are needed to asses this key point.

Agradecimientos / Acknowledgements

El presente trabajo de investigación ha sido parcialmente financiado con fondos provenientes del MINECO y FEDER (contrato “BlueCons” BIA2014-55576-C2-2-R) y del **Grupo Consolidado del Gobierno Vasco (IT781-13: <https://www.ehu.eus/es/web/scm/home>)**.

Present research work was partially financed through Spanish Ministry MINECO and FEDER funds (contract “BlueCons” BIA2014-55576-C2-2-R) and by the Basque Government Consolidated Research Group (IT781-13: <https://www.ehu.eus/en/web/scm/home>).

Apéndice de siglas ordenadas alfabéticamente

a/c	Relación agua/cemento
AODS	Argon Oxygen Decarburization Slag (Escoria de Descarburación con O ₂ y Ar o de AOD)
BFS	Blast Furnace Slag (Escoria de Horno Alto)
BOF	Basic Oxygen Furnace (Convertidor Básico de Oxígeno o Convertidor LD)
CCP	Convencional Concrete Pavements
C-S-H	Silicato Cálcico Hidratado
DSC	Differential Scanning Calorimetry (Calorimetría Diferencial de Barrido)
DTA	Differential Thermal Analysis (Análisis Térmico Diferencial)
EAFS	Electric Arc Furnace Slag (Escoria de Horno Eléctrico de Arco, o negra)
HAC	Hormigón Autocompactante
HAR	Hormigón de Alta Resistencia
HC	Hormigón Convencional
HCR	Hormigón Compactado con Rodillo
HEA	Horno Eléctrico de Arco
ITZ	Interfacial Transition Zone (Zona de Transición Interfacial)
LDS	Linz-Donawitz process Slag (Escoria del proceso LD/Linz-Donawitz)
LFS	Ladle Furnace Slag (Escoria de Horno Cuchara, o blanca)
NFU	Neumáticos Fuera de Uso
RCC	Roller Compacted Concrete
RCD	Residuos de Construcción y Demolición
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SEM	Scanning Electron Microscopy (Microscopía Electrónica de Barrido)
TGA	Thermogravimetric Analysis (Análisis Termogravimétrico)
XRD	X-ray diffraction (Difracción de rayos X)

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Aspectos generales

Desde sus inicios la especie humana ha explotado los diversos recursos que la naturaleza ha puesto a su alcance, sin apenas causar efectos a su alrededor. Sin embargo, a partir del siglo XX el constante desarrollo socioeconómico y los avances tecnológicos e industriales han dado lugar a una economía basada en el consumo y la cultura del “usar y tirar” que generan impactos cada vez mayores en el medio ambiente [1].

La generación de residuos es uno de los retos ambientales más complejos al que se enfrentan las sociedades modernas. El incremento en la producción de residuos a escala global es continuo. Por esta razón, es necesario llevar a cabo su correcta gestión a fin de evitar impactos negativos en el planeta y poder conservar los recursos naturales, reducir el consumo energético y disminuir las emisiones contaminantes y la demanda de vertederos.

La valorización de residuos, que consiste en su utilización como sustitutivo de otros productos en un proceso productivo, es una de las posibles soluciones para lograr los objetivos mencionados. Según datos de EUROSTAT, el 61% de los residuos generados en España se destinan a valorización, mientras que el 37% termina en vertederos. Si bien es cierto que el volumen de residuos producidos en nuestro país ha decaído en los últimos años, el sector de la construcción (a veces denominado hipersector, por su transversalidad) sigue siendo uno de sus mayores productores [2].

Este sector es considerado mundialmente como una de las principales fuentes de contaminación ambiental, ya que consume una gran cantidad de recursos naturales. Recursos no renovables para la extracción de materias primas. Sector que, además, genera un volumen de residuos (RCDs, de construcción y demolición, por ejemplo) inasumible para el medioambiente. Todo ello, sumado al alto consumo de energía requerido, así como de sus consecuentes emisiones (gaseosas y polvo). Por este motivo, es fundamental proceder al desarrollo de métodos de aprovechamiento de residuos, al objeto de progresar hacia una construcción más sostenible y entornos alineados con los conceptos de la llamada *economía circular* [3].

La industria siderúrgica, asimismo, produce un número considerable de residuos (subproductos) procedentes de su proceso de obtención y fabricación de materiales. Y que, entre otros (refractarios, electrodos, etc.), los más numerosos son las llamadas “escorias siderúrgicas”. Un modo de darle uso a estos residuos, y evitar así mayores impactos ambientales, se basa en reutilizarlos como áridos para la fabricación de hormigones, desde luego, más sostenibles en todos sus planos: ambiental, económico, social y funcional [3 - 5].



- [94] ASTM C1170/C1170M. "Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table".
- [95] ASTM C33/C33M. "Standard Specification for Concrete Aggregates".
- [96] L. Coppola, A. Buoso, D. Coffetti, P. Kara, S. Lorenzi. "Electric arc furnace granulated slag for sustainable concrete". *Construction and Building Materials* 123 (2016), p. 115-119.
- [97] I. Arribas, A. Santamaria, E. Ruiz, V. Ortega-Lopez, J. M. Manso. "Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete". *Construction and Building Materials* 23 (2015), p. 68-79.
- [98] C. Pellegrino, P. Cavagnis, F. Faleschini, K. Brunelli. "Properties of concretes with Black/Oxidizing Electric Arc Furnace slag aggregate". *Cement and Concrete Composites* 37 (2013), p. 232-240.
- [99] A. Santamaría, E. Rojí, M. Skaf, I. Marcos, J. J. González. "The use of steelmaking slags and fly ash in structural mortars". *Construction and Building Materials* 106 (2016), p. 364-373.
- [100] A. Rodríguez, J. M. Manso, A. Aragón, J. J. González. "Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag". *Resources, Conservation and Recycling* 53 (2009), p. 645-651.
- [101] A. Santamaría, A. Orbe, M. M. Losañez, M. Skaf, V. Ortega-Lopez, J. J. González. ". Self-compacting concrete incorporating electric arc-furnace steelmaking slag as aggregate". *Materials and Design* 115 (2017), p. 179-193.
- [102] F. Faleschini, M. A. Fernández-Ruíz, M. A. Zanini, K. Brunelli, C. Pellegrino, E. Hernández-Montes. "High performance concrete with electric arc furnace slag as aggregate: Mechanical and durability properties". *Construction and Building Materials* 101 (2015), p. 113-121.
- [103] A. Sidorova. "Estudio del efecto de la naturaleza del árido reciclado en la microestructura y propiedades de la zona de transición árido-pasta de cemento". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 2013.
- [104] P. K. Mehta, P. J. M. Monteiro. "Concrete: Microstructure, Properties, and Materials". Fourth ed., McGraw-Hill, New York, 2014.
- [105] F. Puertas, A. Palomo, M. T. Blanco. "Microestructuras interfaciales en el hormigón". *Materiales de construcción* 41 (1991), p. 91-106.
- [106] M. Ozturk, O. Akgol, U. K. Sevim, M. Karaaslan, M. Demirci, E. Unal. "Experimental work on mechanical, electromagnetic and microwave shielding effectiveness properties of

- mortar containing electric arc furnace slag". *Construction and Building Materials* 165 (2018), p. 58-63.
- [107] J. M. Manso, A. Rodríguez, A. Aragón, J. J. González. "The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag". *Construction and Building Materials* 25 (2011), p. 3508-3519.
- [108] ASTM C39/C39M-14. "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens".
- [109] ASTM C78/C78M. "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete".
- [110] ASTM C496/C496M. "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens".
- [111] F. Autelitano, F. Giuliani. "Electric arc furnace slags in cement-treated materials for road construction: Mechanical and durability properties". *Construction and Building Materials* 113 (2016), p. 280-289.
- [112] ASTM C469-02. "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression".
- [113] ASTM C157/C157M. "Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete".
- [114] ASTM C642-13. "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete".
- [115] ASTM C666/C666M. "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing".
- [116] ASTM C672/C672M. "Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals".