



Euskal Herriko Unibertsitatea
Universidad del País Vasco
University of the Basque Country



Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoa
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Bilbao

*ESCORIAS BLANCAS DE
ACERÍA (LFS) EN MEZCLAS
HIDRÁULICAS. SU
VALORACIÓN Y DISCUSIÓN
COMO MATERIA PRIMA*

21 de Febrero de 2018

AUTOR: D. SCOTT GONZALO QUEVEDO GÓMEZ

TUTOR: Dr. D. JOSÉ TOMÁS SAN JOSÉ LOMBERA

TITULACIÓN: MÁSTER EN INGENIERÍA DE MATERIALES AVANZADOS



Euskal Herriko Unibertsitatea
Universidad del País Vasco
University of the Basque Country



ESCORIAS BLANCAS DE ACERÍA (LFS) EN MEZCLAS HIDRÁULICAS. SU VALORACIÓN Y DISCUSIÓN COMO MATERIA PRIMA

MÁSTER EN INGENIERÍA DE MATERIALES AVANZADOS

Autor

D. SCOTT GONZALO QUEVEDO GÓMEZ

Tutor

Dr. D. JOSÉ TOMÁS SAN JOSÉ LOMBERA

AGRADECIMIENTOS

Tras un período intenso de varios meses, hoy es el día, escribo este apartado de agradecimientos para finalizar mi Trabajo de Fin de Máster. Ha sido un período de aprendizaje no solo a nivel de investigación sino también a nivel personal. Llevar a cabo este trabajo ha supuesto tiempo y esfuerzo, es por ello que me gustaría agradecer a todas aquellas personas que me han ayudado y apoyado durante este proceso.

En primer lugar, señalar que este trabajo ha sido posible en parte gracias a los fondos obtenidos desde el Ministerio del Gobierno de España y los fondos FEDER, vía el contrato Retos 2014 BIA2014-55576-C2-2-R, así como por la financiación del **Gobierno Vasco (Grupo de Investigación Consolidado IT781-13)**, ambos coordinados por el tutor del presente estudio.

Debo realizar una mención especial a mi tutor el Dr. D. José Tomás San José Lombera por el tiempo que me ha dedicado desde el momento de la elección de este proyecto, estando ahí cada vez que he requerido de su ayuda. Gracias a él y a los Doctores D. Javier Jesús González y Dña. Amaia Santamaría, miembros del Departamento de Ingeniería Minera, Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, he podido disponer de las herramientas necesarias para la satisfactoria realización de este trabajo.

Finalmente, a mi familia y a Marta por su continuo apoyo y sus consejos que han hecho mucho más llevadero este trabajo para llevarlo a buen puerto.

RESUMEN

El presente trabajo es el resultado de la búsqueda, síntesis y valoración de las diferentes aplicaciones de las escorias blancas obtenidas mediante la metalurgia secundaria.

Con el paso de los años se ha agravado la situación del depósito de escorias en vertederos produciendo en la sociedad, el medio ambiente y las empresas productoras de acero importantes conflictos. Ello se debe a la falta de opciones de uso y tratamiento para las escorias obtenidas tras la metalurgia secundaria o fase de afino. Fruto de esta problemática se han abierto nuevas vías de investigación y desarrollo de técnicas de reutilización y reciclado de subproductos industriales que antes eran desechados. En consecuencia, ha surgido la valorización de las escorias procedentes de la fase de afino durante la producción de acero, también conocida como escoria blanca.

Es por todo ello que, a continuación se llevará a cabo una aproximación a los diferentes sectores ingenieriles donde se estudian y/o aplican este tipo de escorias.

Aunque se muestra como un material con buena proyección, especialmente en el sector de la construcción, para su uso fuera de los laboratorios o campos de investigación requiere la aclaración de ciertos aspectos relacionados especialmente con su efecto sobre matrices cementicias.

A pesar de ello, se considera un subproducto con importantes posibilidades de futuro, especialmente como sustituto parcial del cemento o finos en morteros de albañilería y como materia prima en estabilización de suelos.

Finalmente, se debe continuar con los estudios de las escorias blancas y buscar nuevos usos con el fin de reducir las emisiones de gases invernadero a la atmósfera y fomentar la utilización de subproductos con el fin de evitar, en la medida de lo posible la explotación de recursos naturales.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVO.....	3
3.	EVOLUCIÓN DE LAS ESCORIAS BLANCAS DE ACERÍA.....	4
3.1.	ANTECEDENTES	4
3.2.	CARACTERÍSTICAS	5
3.3.	PROBLEMÁTICA	7
3.4.	SITUACIÓN GENERAL DE LA INDUSTRIA	8
3.5.	ALCANCE E IMPACTO ACTUAL.....	11
4.	ESTADO DEL ARTE.....	12
4.1.	ESCENARIO ACTUAL.....	12
4.2.	LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA.....	13
4.3.	RESIDUOS DE PRODUCCIÓN.....	14
4.4.	SUBPRODUCTOS INDUSTRIALES	15
4.5.	PRODUCCIÓN DE LAS ESCORIAS SIDERÚRGICAS	18
4.6.	PRODUCCIÓN DE ACERO EN HORNO ELÉCTRICOS.....	24
4.7.	LA ESCORIA BLANCA.....	30
4.8.	PROPIEDADES DE LA ESCORIA BLANCA	34
4.9.	LA INESTABILIDAD DE LA ESCORIA LFS	48
4.10.	APLICACIONES DE LAS ESCORIAS BLANCAS	54
5.	INVESTIGACIONES RELEVANTES SOBRE EL PAPEL DE LAS LFS EN SUS DIFERENTES ÁMBITOS DE APLICACIÓN	57
5.1.	CARACTERIZACIÓN.....	57
5.2.	MEDIOAMBIENTE.....	62
5.3.	EDIFICACIÓN	65
5.4.	OBRA CIVIL.....	81
6.	CONCLUSIONES	88
7.	REFERENCIAS	91

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de la industria siderúrgica en España.....	9
Figura 2. Peso relativo de la industria siderúrgica por CCAA.....	14
Figura 3. Proceso siderúrgico general	20
Figura 4. Horno eléctrico de arco (HEA).....	21
Figura 5. Volumen porcentual de residuos del acero.	22
Figura 6. Tipos de escoria de horno alto (BFS).....	23
Figura 7. Proceso de fabricación de acero con hornos eléctricos de arco (EAF) y horno cuchara (LF)	25
Figura 8. Proceso de obtención escorias LFS.....	30
Figura 9. LFS recién volcada desde el horno cuchara.....	34
Figura 10. Interior de la LFS	35
Figura 11. Morfología de LFS en su estado final.....	35
Figura 12. Microscopía electrónica de LFS	36
Figura 13. Microscopía electrónica de LFS	37
Figura 14. Análisis granulométrico LFS	37
Figura 15. Partículas de LFS saturada en alúmina en forma de grava	38
Figura 16. Microscopía electrónica LFS saturada en alúmina. (a) arena y polvo. (b) ..	38
Figura 17. Microscopía electrónica de superficie partícula arena LFS	39
Figura 18. DRX de LFS antes y después del enfriamiento rápido	44
Figura 19. Microscopía electrónica de LFS.	44
Figura 20. Microscopía electrónica de LFS con contenido de solución sólida	45
Figura 21. Desarrollo de la resistencia a compresión de los prismas.....	60
Figura 22. Microscopía SEM de LFS modificada mediante granulación del agua.....	61
Figura 23. Patrones XRD de LFS enfriado rápidamente.....	61
Figura 24. Tendencia a la formación de vidrio en función de la temperatura de la escoria líquida.....	62
Figura 25. Morfología de las EAFS	64

Figura 26. Apariencia de las muestras elaboradas con 100% LFS con diferentes grados de finura (#100, #50, # 16) bajo condiciones de autoclave	66
Figura 27. Morfología de piedra caliza, escorias de alta alúmina (LFS1) y alto sílice (LFS2).....	73
Figura 28. Consecuencias de la expansión volumétrica de las LFS tras los test de durabilidad.....	75
Figura 29. Desarrollo de la resistencia de las mezclas de hormigón.....	77
Figura 30. Daños producidos a la mezcla D4 tras el ensayo de congelación y descongelación.....	79
Figura 31. Sección transversal de una viga fracturada con un contenido de 0.4% de fibras metálicas	81

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Principales fases en el proceso de fabricación de acero.	31
Tabla 2. Composición química de las escorias blancas (LFS)	41
Tabla 3. Composición química de escorias blancas en función de su granulometría....	42
Tabla 4. Composición mineralógica de las escorias blancas	46
Tabla 5. Composición mineralógica de LFS según su grado de finura	47
Tabla 6. Ensayos de verificación de la expansión	49
Tabla 7. Métodos de análisis aplicados por diferentes autores.....	60
Tabla 8. Composición química de las EAFS	64
Tabla 9. Resultados de los ensayos de durabilidad de los morteros.....	70
Tabla 10. Composición de los morteros	71
Tabla 11. Dosificación y porosimetría en morteros de yeso con LFS.....	72
Tabla 12. Dosificación de las mezclas de mortero en kg/m ³	74
Tabla 13. Resultados de los ensayos mecánicos.....	74
Tabla 14. Peso específico y resistencia a compresión de las mezclas de hormigón.....	77
Tabla 15. Características de durabilidad de las mezclas de hormigón ensayadas.	77
Tabla 16. Propiedades físicas y mecánicas del hormigón endurecido.....	78
Tabla 17. Resultados del ensayo congelación y descongelación.....	79
Tabla 18. Resumen de las dosificaciones de los estudios anteriores.....	80
Tabla 19. Dosificación de las mezclas de suelos	83
Tabla 20. Propiedades geotécnicas de las muestras de suelo y las mezclas	83
Tabla 21. Propiedades geotécnicas de los suelos y sus mezclas	84
Tabla 22. Dosificación de las mezclas.....	85
Tabla 23. Comportamiento mecánico de las mezclas.....	85
Tabla 24. Tipos de escorias y composición de las mezclas.....	86
Tabla 25. Propiedades mecánicas tras 7 días de curado.	86

1. INTRODUCCIÓN

La producción de hierro comenzó hace aproximadamente 30 siglos en Asia Menor, extendiéndose con posterioridad los procedimientos requeridos para su fabricación a Europa y el Norte de África. Esto dio lugar a lo que actualmente se conoce como la Edad del Hierro, precedida por la Edad del Bronce y la Edad de Piedra.

Sin embargo, es a raíz de la siderurgia por la que se requiere de otros minerales no metálicos en los procesos de refinado o purificación química. Estos minerales dan lugar a lo que se conoce como escoria metálica, fruto de las transformaciones que sufren durante el proceso siderúrgico.

Así las cosas, el término escoria se emplea normalmente con tono despectivo, a pesar de que representa un subproducto dotado con ciertas cualidades que han permitido su uso a lo largo de la historia y, en el fondo, muy necesario para una correcta obtención y fabricación de los metales y sus aleaciones.

Por otro lado, actualmente la producción y gestión de residuos supone un problema ambiental arduo y comprometido en las zonas con mayor nivel de desarrollo. La gestión incorrecta o inadecuada de los residuos, así como su abandono, dan lugar a impactos importantes en los medios receptores. No obstante, si los residuos son bien gestionados se tienen recursos que contribuyen al ahorro de materias primas debido a la conservación de los recursos naturales lo cual proporciona un desarrollo sostenible en lo que actualmente constituye la economía circular.

El presente trabajo no trata sino de alcanzar una visión crítica de las diferentes aplicaciones de las escorias blancas de acería. Este tipo de escoria lleva siendo objeto de estudio desde los años noventa para posteriores prácticas en diversos sectores como la construcción, entre los que se incluye la estabilización de suelos, regulación del pH de los terrenos y mezclas hidráulicas. Para ello será necesario analizar en profundidad el proceso productivo de dichas escorias, así como realizar un exhaustivo estudio del impacto de las mismas en los diferentes sectores.

Y todo ello, como vía para alcanzar una opinión personal correctamente fundamentada sobre el fondo del asunto.

Las escorias blancas de acería como materia prima constituyen sin lugar a dudas una apuesta de reciente introducción pero con grandes logros que aportar.

Este artículo comenzará con una breve exposición de sus antecedentes. A continuación, habremos de centrarnos en su problemática fundamental, así como su alcance para acabar acercándonos al estado del arte. Para esto último será necesario conocer de primera mano entre otros aspectos la industria siderúrgica. Finalmente, analizaremos sus propiedades y aplicaciones, así como sus expectativas a futuro.

- PROCTOR, D., FEHLING, K., SHAY, E., WITTENBORN, J., GREEN, J., AVENT, C., BIGHAM, R., CONNOLLY, M., LEE, B. and SHEPKER, T., 2000. Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags. *Environmental science & technology*, 34(8), pp. 1576-1582.
- RAAB, B., STÖBER, S. and PÖLLMANN, H., 2008. Investigations of the hydration behaviour of pure cement phases by different synthesis methods, *Proceedings of the Centenary Conference 2008*, pp. 79-92.
- RAĐENović, A., MALINA, J. and SOFIĆ, T., 2013. Characterization of ladle furnace slag from carbon steel production as a potential adsorbent. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013.
- RAMACHANDRAN, V.S., SEREDA, P.J. and FELDMAN, R., 1964. Mechanism of hydration of calcium oxide. *Nature*, 201(4916), pp. 288.
- RODRÍGUEZ, A., 2008. Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción. *Universidad Politécnica de Burgos, España*, .
- RODRIGUEZ, Á, MANSO, J.M., ARAGÓN, Á and GONZALEZ, J.J., 2009. Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(11), pp. 645-651.
- RODRÍGUEZ, A., GUTIÉRREZ-GONZÁLEZ, S., HORGNIÉS, M. and CALDERÓN, V., 2013. *Design and properties of plaster mortars manufactured with ladle furnace slag*.
- ROJAS, M.F., LOMBERA, JOSÉ TOMÁS SAN JOSÉ and VEGAS, I., 2010. Árido siderúrgico en hormigones: proceso de envejecimiento y su efecto en compuestos potencialmente expansivos. *Materiales de construcción*, (297), pp. 33-46.
- ROVNUSHKIN, V., VISLOGUZOVA, E., SPIRIN, S., SHEKHOVTSOV, E., KROMM, V. and METELKIN, A., 2005. Composition of ladle slag and refractory materials and its effect on the wear resistance of the lining of an RH vacuum degasser. *Refractories and Industrial Ceramics*, 46(3), pp. 193-196.
- SAN-JOSÉ, J.T., VEGAS, I., ARRIBAS, I. and MARCOS, I., 2014. *The performance of steel-making slag concretes in the hardened state*.
- SANTAMARÍA, A., ROJÍ, E., SKAF, M., MARCOS, I. and GONZÁLEZ, J.J., 2016. *The use of steelmaking slags and fly ash in structural mortars*.
- SERJUN, V.Z., MIRTÍČ, B. and MLADENović, A., 2013a. Evaluation of ladle slag as a potential material for building and civil engineering. *Mater Tehnol*, 47(5), pp. 543-550.
- SERJUN, V.Z., MIRTÍČ, B. and MLADENović, A., 2013b. Evaluation of ladle slag as a potential material for building and civil engineering. *Mater Tehnol*, 47(5), pp. 543-550.
- SETIÉN, J., HERNÁNDEZ, D. and GONZÁLEZ, J.J., 2009. *Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material*.
- SHI, C., 2004. Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(3), pp. 230-236.
- SHI, C., 2002. *Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production*.

- SHI, C. and HU, S., 2003. *Cementitious properties of ladle slag fines under autoclave curing conditions*.
- SHI, C. and QIAN, J., 2000. *High performance cementing materials from industrial slags — a review*.
- SHINKAI, M., TSUNO, M. and OGAWA, N., 1997. Used-refractories recycle technology in melting shop. *Denki Seiko(Electric Furnace Steel)(Japan)*, 68(4), pp. 295-299.
- SKAF, M., ORTEGA-LÓPEZ, V., FUENTE-ALONSO, J., SANTAMARÍA, A. and MANSO, J., 2016. Ladle furnace slag in asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, 122, pp. 488-495.
- SMOLCZYK, H., 1980. Slag structure and identification of slags. *Proc.7th ICCS*, 1.
- SOFILIĆ, T., MLADENOVIĆ, A., OREŠČANIN, V. and BARIŠIĆ, D., 2013. Characterization of ladle furnace slag from the carbon steel production, *International foundrymen conference "Innovative Foundry Processes and Materials"(13; 2013)* 2013.
- THOMAS, G., 1983. Investigations on LD slag with particular reference to its use for road construction. *Commission of the European Communities*, , pp. 75.
- TOSSAVAINEN, M., ENGSTROM, F., YANG, Q., MENAD, N., LARSSON, M.L. and BJORKMAN, B., 2007. Characteristics of steel slag under different cooling conditions. *Waste Management*, 27(10), pp. 1335-1344.
- TOSSAVAINEN, M. and FORSSBERG, E., 2000. Leaching behaviour of rock material and slag used in road construction-amineralogical interpretation. *steel research international*, 71(11), pp. 442-448.
- TÜFEKÇI, M., DEMIRBAŞ, A. and GENC, H., 1997. Evaluation of steel furnace slags as cement additives. *Cement and Concrete Research*, 27(11), pp. 1713-1717.
- VILAPLANA, A.S., FERREIRA, V.J., LÓPEZ-SABIRÓN, A.M., ARANDA-USÓN, A., LAUSÍN-GONZÁLEZ, C., BERGANZA-CONDE, C. and FERREIRA, G., 2015. Utilization of ladle furnace slag from a steelwork for laboratory scale production of Portland cement. *Construction and Building Materials*, 94, pp. 837-843.
- YILDIRIM, I.Z. and PREZZI, M., 2011. Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Advances in Civil Engineering*, 2011.