

# Uso prometedor de la escoria blanca de acería en materiales de construcción.

## *Promising use of ladle furnace slag for construction materials*

Amaia Santamaría<sup>\*, a</sup>, Vanesa Ortega-López<sup>b</sup>, Marta Skaf<sup>c</sup>, Flora Faleschini<sup>d</sup>, José Tomás San José<sup>e</sup>, Javier Jesús González<sup>f</sup>

<sup>a</sup> Dr. Universidad del País Vasco UPV/EHU. Profesor Laboral Interino Departamento Ingeniería Mecánica.  
amaia.santamaria@ehu.es

<sup>b</sup> Dr. Escuela Politécnica Superior Universidad de Burgos. Profesor Contratado Doctor Departamento Ingeniería Civil  
vortega@ubu.es

<sup>c</sup> Dr. Escuela Politécnica Superior Universidad de Burgos. Profesor Ayudante Doctor Departamento de Construcción  
mskaf@ubu.es

<sup>d</sup> Dr. Universidad de Padova Profesor Contratado Doctor Departamento de Ingeniería Civil, Medio Ambiental y Arquitectura.  
flora.faleschini@dicea.unipd.it

<sup>e</sup> Dr. Universidad del País Vasco UPV/EHU Profesor Titular de Universidad Departamento Ingeniería Minero Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. josetomas.sanjose@ehu.es

<sup>f</sup> Dr. Universidad del País Vasco UPV/EHU Catedrático de Universidad Departamento Ingeniería Minero Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. javierjesus.gonzalez@ehu.es

### RESUMEN

El principal objetivo de este trabajo es la reutilización de la Escoria Blanca (LFS), residuo proveniente del afino del acero. Se propone utilizar este subproducto como adición al cemento sustituyendo parcialmente el Clinker de cemento Portland. Para ello se han fabricado una serie de morteros con sustituciones parciales de cemento Portland por LFS en proporciones de 0%, 10%, 20%, 30% y 40%, respectivamente, en masa. Se han estudiado las características mecánicas de estos morteros, obteniendo resultados esperanzadores hasta contenidos del 30%. Por otro lado, los morteros han sido sometidos a ensayos de envejecimiento acelerado, observándose que si se introduce en los morteros un contenido superior al 20% de LFS el efecto podría ser muy dañino.

### ABSTRACT

The aim of this research is the reuse of Ladle Furnace slag (LFS), a waste that is generated in the second refining of the production process of steel. Many have been the uses proposed in the literature for LFS, in this research its use as binder, replacing Portland cement, is going to be analysed. For this purpose mortar mixes replacing Portland clinker by LFS in a mass percentage of 0%, 10%, 20%, 30% and 40%, respectively, have been manufactured. Mechanical properties of these mortars have been evaluated, obtaining encouraging results until the 30% of substitution. The mortar specimens have also be submitted to accelerated ageing test, showing that if more than 20% of LFS is used the effects could be very harmful.

**PALABRAS CLAVE:** Escoria Blanca, Cemento Portland, Morteros, Compuestos expansivos.

**KEYWORDS:** Ladle Furnace Slag, Portland cement, Mortars, Expansive compounds.

## 1. Introducción

La producción de acero en España se centra en el norte de la península, una pequeña región que tendrá que absorber el gran volumen de residuos que genera esta industria, en el caso que no sean reutilizados.

Son diversos los trabajos en los que se estudia el uso de subproductos industriales de la industria del acero en el sector de la construcción [1-4].

Tanto la industria del acero, como la del cemento tienen una gran importancia en la economía del país. Por otro lado, ambas industrias también generan una gran cantidad de CO<sub>2</sub> (a nivel mundial cada una de estas industrias es la responsable del 5% de las emisiones globales) y consumen un gran volumen de materias primas.

Este estudio tiene como objetivo intentar que ambas industrias sean más sostenibles, compartiendo sinergias, reduciendo el número de residuos producidos por la industria del acero y disminuyendo la cantidad de Clinker de Portland necesaria en la fabricación de cementos, vía la integración de parte de aquellos en su producción. Todo lo que vendría en reducir la cantidad de energía y de materias primas naturales necesarias en la producción del cemento.

Este objetivo se pretende conseguir utilizando la Escoria Blanca (LFS), también conocida como escoria de horno de cuchara, como adición al cemento, promoviendo que fuera incluida en la norma UNE-EN 197-1[5].

La escoria blanca proviene del proceso de afino del acero, concretamente de su desulfuración. Su producción es prácticamente nula en la siderurgia integral, pero en el proceso de fabricación del acero en hornos de arco

eléctrico (acería compacta) se generan entorno a 70kg- LFS /t-acero [6].

Teniendo en cuenta que en el año 2018 en España se produjeron unas  $9.7 \times 10^6$  t de acero [7] en hornos eléctricos de arco, se generaron alrededor de 679000 t de LFS /año, con el añadido de ser un residuo considerado como agresivo por su capacidad de lixiviar compuestos dañinos a ciertos suelos si no está adecuadamente encapsulado, como se pretende con la siguiente investigación

En la escoria blanca predominan los óxidos básicos, el contenido de CaO y MgO representa alrededor del 65% de los óxidos totales [8].

La forma más común en la que se encuentra la LFS es como partículas pulverulentas, siendo la responsable de este aspecto la desintegración espontánea que sufre durante su enfriamiento, debido a la transformación alotrópica expansiva del silicato cálcico beta en silicato cálcico gamma.

En cuanto a sus características físicas, si se observa en un microscopio electrónico de barrido, puede verse que las partículas pulverulentas son cristales poliédricos o partículas irregulares formando cristales poliédricos, porosos y de cantos afilados.

En función del método de saturación de la escoria líquida, pueden diferenciarse tres tipos de escoria blanca:

- Escoria blanca alta en sílice (en la que se centra este trabajo).
- Escoria blanca alta en alúmina.
- Escoria blanca con contenidos parecidos de sílice y alúmina.

Se conoce que el 80% de la masa de la escoria blanca está compuesta por silicatos cálcicos y aluminatos cálcicos, con presencia de

magnesio y otros cationes. El restante 20% lo constituye sulfuros, hierro metálico (eliminable mediante métodos magnéticos) titanio, manganeso, sodio y potasio. También puede encontrarse Cal libre y Magnesia libre [9]. Compuestos responsables, en gran parte, de que hoy en día la LFS esté colmatando vertederos en vez de ser valorizada como materia prima en el sector de la construcción.

El problema es que estos compuestos son expansivos, la cal libre en contacto con el agua forma hidróxido cálcico, duplicando su volumen inicial. Este proceso se produce durante varios días o semanas. Mayor problema presenta la hidratación de la Magnesia libre (periclasa) formando hidróxido de magnesio. En este caso también se duplica el volumen inicial de las partículas, pero la problemática aumenta al darse esta reacción tras varias semanas o meses.

A pesar de estos compuestos, se ha observado en diferentes trabajos que el uso de la LFS en materiales de base cemento es positivo, siempre y cuando la cantidad usada sea moderada [10,11].

Este estudio se centra en la reutilización de LFS alta en sílice como sustituta del Clinker de cemento Portland. Para ello se fabricarán una serie de morteros de los cuales se estudiarán sus propiedades mecánicas. Adicionalmente, estos morteros serán sometido a ensayos de envejecimiento acelerado, al objeto de promover y acelerar las reacciones expansivas que se pudieran dar, amén de intentar establecer un reemplazo máximo de Clinker de cemento Portland por LFS.

## 2. Diseño de Mezclas


### 2.1 Materiales

Los materiales utilizados para la realización del presente trabajo han sido:

- Cemento Portland tipo I 42,5 R, según lo especificado en la norma UNE-EN 197-1 [5].

- Agua obtenida del suministro de red de Bilbao, que no contiene ningún elemento que pueda perjudicar el buen comportamiento de las mezclas.
- Áridos calizos de granulometría 0-5 mm y con una densidad de 2670 kg/m<sup>3</sup>.
- Escoria blanca alta en sílice cuya composición química se puede observar en la Tabla 1.
- Aditivo Plastificante


**Tabla 1. Composición química de la escoria.**

Compuesto	Cantidad [%]
CaO	59.2
SiO <sub>2</sub>	21.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.27
MgO	7.92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0
TiO <sub>2</sub>	0.17
MnO	0.26
C	0.13
	1,39
Otros	0.36

### 2.2 Mezclas

Con los materiales descritos en el apartado anterior se han diseñado 5 mezclas, según norma UNE-EN 196-1 [5] para la determinación de resistencias mecánicas de cementos.

La norma indica que debe usarse una parte de masa de cemento (en este caso conglomerante, en general), 3 partes en masa de arena y media parte de agua. Teniendo en cuenta las densidades de los materiales la mezcla patrón diseñada contiene 513 kg/m<sup>3</sup> de cemento, 1540 kg/m<sup>3</sup> de arena caliza y una relación agua cemento de 0,5, esta mezcla se denominará LFS0. En las siguientes mezclas las proporciones de conglomerante, áridos y agua se mantienen. La diferencia entre ellas, reside en la sustitución de cemento por Escoria blanca en proporciones del

 % en LFS10, 20% en LFS20, 30% en LFS30 y 40% en LFS40.

Además, las mezclas se han diseñado para tener una consistencia de  $170\pm 3$  mm en la mesa de sacudidas. Para conseguirlo, ha sido necesario utilizar diferentes proporciones de plastificante en cada mezcla.

### 3. Preparación de probetas y ensayos realizados

Las mezclas se han preparado siguiendo las indicaciones de la norma UNE EN 196-1[5]. Primeramente, se ha mezclado el agua, el plastificante y el cemento. Se han introducido los materiales en una amasadora estándar, y se ha amasado a velocidad lenta durante 30 segundos. Sin detener la amasadora, ni modificar la velocidad durante los siguientes 30 segundos que se vierte la arena. Una vez vertida la arena se pasa a velocidad rápida y se amasa 30 segundos. Se detiene el amasado durante 90 segundos, se aprovecha este intervalo para retirar con una espátula el mortero adherido a las paredes del vaso de la amasadora. Para finalizar se amasa 60 segundos a velocidad rápida.

Una vez finalizado el amasado se realiza el ensayo de consistencia de la mezcla, en esta ocasión se ha utilizado la mesa de sacudidas siguiendo las indicaciones de la norma ASTM C230 [12].

Tras concluir el proceso anterior se vuelve a introducir la masa utilizada en la amasadora y se mezcla todo el conjunto durante 30 segundos a velocidad rápida.

Se utilizan moldes de  $40\times 40\times 160$  mm<sup>3</sup>, además de un bi-molde de  $25\times 25\times 285$  mm<sup>3</sup>. La masa se vierte en las probetas en 2 tongadas, compactando cada tongada con 60 golpes. Tras la compactación se enrasa la última capa con una regla y se retira el mortero excedente.

Durante las primeras 24 horas las probetas permanece en cámara húmeda, tras este periodo se desmoldan y se conservan sumergidas bajo el agua hasta el momento de su utilización.

Se ha evaluado la densidad de las probetas utilizando el principio de Arquímedes.

La resistencia de las probetas se medirá a los 7, 28 y 90 días, respectivamente. El ensayo a los 3 días no se ha realizado, debido a que la reacción de las escorias se espera que sea a largo plazo, siendo más interesantes las resistencias obtenidas a edades avanzadas que en los primeros días.

Los ensayos de compresión y flexotracción se han ejecutado siguiendo lo establecido en las normas ASTM C348 y ASTM C349 [12] respectivas.

Tras 180 días de curado, las probetas han sido sometidas a dos ensayos de envejecimiento acelerado.

El primer ensayo consiste en sumergir las probetas de 285 mm en agua a 70°C, a las que previamente se les ha introducido unas puntas (a modo de palpadores) al objeto de permitir medir su variación dimensional, siguiendo lo expuesto en la ASTM D4792 [12]. Las probetas, saturadas en agua, se miden antes de sumergirlas en el agua caliente y tras un mes de inmersión. El objetivo de este ensayo, al igual que del siguiente, es acelerar las posibles reacciones de expansión que puedan darse, así como evaluar el daño que producen en las probetas.

El segundo ensayo consiste en introducir las probetas en una autoclave a 0,2 MPa de presión y 130°C de temperatura. Este ensayo es una adaptación, del propuesto para medir la expansividad de los áridos en la norma española NLT-361. Hasta la fecha las probetas llevan 803 horas de funcionamiento en autoclave, a las que se añade el que cada 48 horas el autoclave se detiene, se evalúa el estado de las probetas, se rellena el agua y, finalmente, se vuelve a poner en marcha.

## 4. Resultados de los ensayos

### 4.1 Consistencia

La consistencia obtenida en todas las mezclas en la mesa de sacudidas ha sido de  $170\pm 3$  mm. Para lograr esta consistencia, ha sido necesario

realizar diversas pruebas con el fin de ajustar la cantidad de plastificante a utilizar en cada caso. La cantidad de plastificante utilizado para la fabricación de cada mezcla se detalla en la Tabla 2. Se ha observado que a mayor porcentaje en la sustitución del cemento por LFS, la cantidad de agua que necesita la mezcla aumenta, quedando compensado en estas mezclas con la adición de **plastificante**.

**Tabla 2. Dosificación plastificante**

Mezcla	Plastificante [% Conglomerante]
S0	1.20
LFS10	1.25
LFS20	1.35
LFS30	1.40
LFS40	1.40

Este fenómeno se explica teniendo en cuenta que, tanto el cemento, como la escoria blanca absorben agua por capilaridad. La mayor absorción por parte de las partículas de LFS es

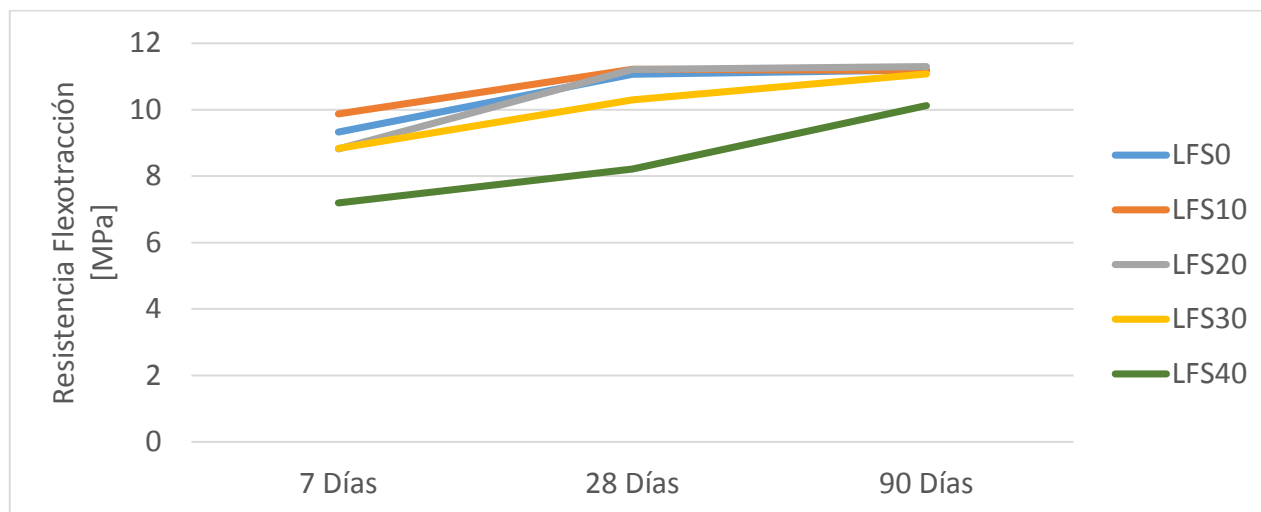
debida a la porosidad de los cristales que la conforman. Cuando el agua llega a los cristales, penetra y rellena sus poros.

#### 4.2 Densidad

A diferencia de otro tipo de escorias, como las negras de primera fusión, la densidad de la escoria blanca es muy similar a la del cemento, incluso en las aquí abordadas resulta algo menor que la del cemento ( $3,000 \text{ kg/m}^3$  vs  $3,100 \text{ kg/m}^3$ ). Es por ello que la densidad de las mezclas obtenidas es muy similar en todos los casos siendo alrededor de  $2,300 \text{ kg/m}^3$ .

#### 4.3 Resistencia a Flexotracción


En la Figura 1 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de flexotracción, los resultados expuestos son la media obtenida tras la realización del ensayo en 3 probetas de la misma amasada.



**Figura 1. Resistencia a flexotracción de los morteros con escoria blanca.**

En general, los resultados que se obtiene de este ensayo presentan cierta dispersión, aunque sí muestran como las 3 primeras mezclas, con contenido de escoria del 0%, 10% y 20%, tienen un comportamiento muy similar. El comportamiento de la amasada LFS30 es algo peor a 28 días pero logra valores muy similares a


90 días. Como ya se ha comentado anteriormente, los resultados más representativos de este estudio serán los obtenidos a edades avanzadas, ya que a edades tempranas se espera que el comportamiento de la escoria sea considerablemente peor que el del cemento. A pesar de la ganancia de resistencia de

28 a 90 días que experimenta la amasada LFS40, los resultados obtenidos son relativamente pobre  considerandose que un 40% de sustitución implica una excesiva perdida de resistencia a flexotracción.

### 4.3 Resistencia a Compresión

En la Figura 2 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de compresión, en este caso los valores incluidos son la media de un total de 3 probetas ensayadas a flexotracción, por lo tanto son 6 las porciones ensayadas a compresión.

Como era de esperar, la mezcla patrón es la que obtiene una resistencia más alta, sin embargo, los resultados obtenidos con sustituciones del 10%, 20% son esperanzadores.

La resistencia de la amasada LFS30 a 90 días es algo inferior a 55 MPa, siendo la perdida de resistencia con respecto a la amasada patrón del orden de 15 MPa. Las resistencias logradas son altas y, por lo tanto, asumible esta bajada de resistencia, de cara a fabricar un material integralmente más sostenible pues, a los aspectos medioambientales, puede sumarse el mantenimiento de unas prestaciones mecánicas básicas, que no  perjudicando su funcionalidad. Además la ganancia de resistencias que se observa en las amasadas LFS20 y LFS30 entre los 28 y 90 días, permite especular que estas amasadas seguiran incrementando sus resistencias a largo plazo. Ganacia que no se espera en las amasadas LFS0, ni LFS10, pues ha sido practicamente nula entre los 28 y 90 días.

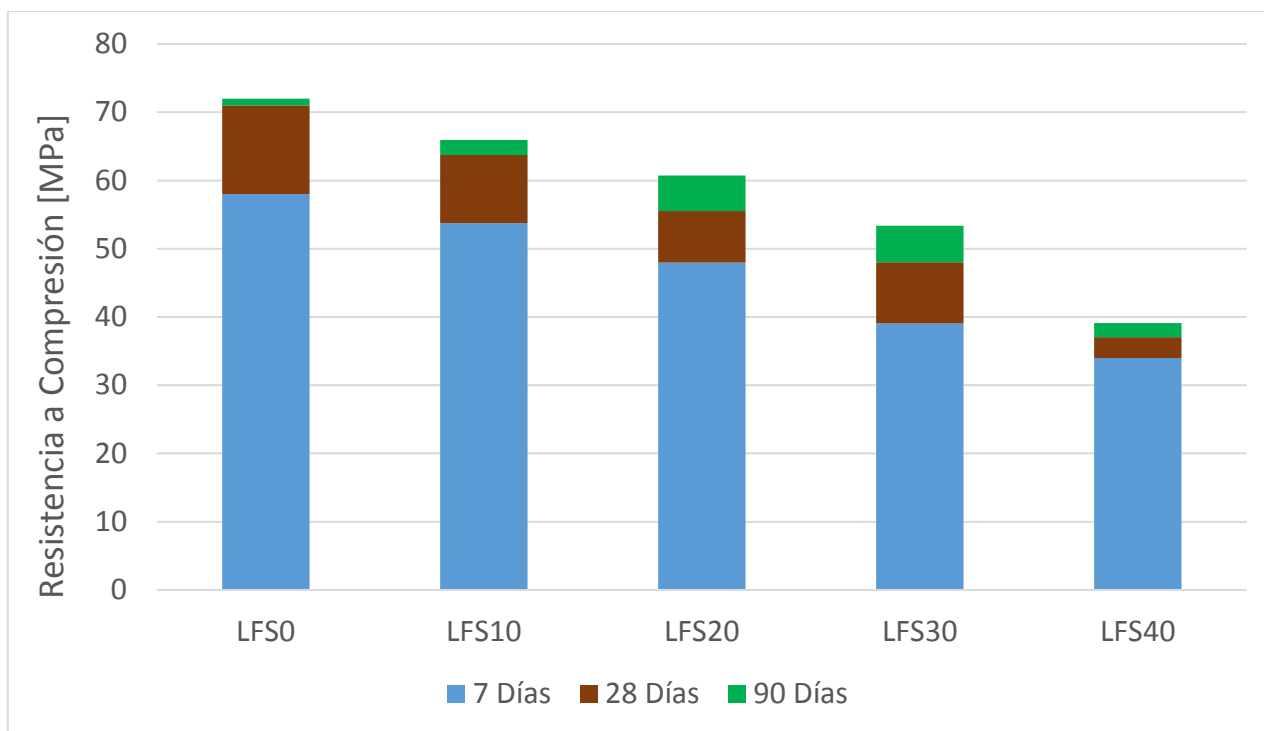



Figura 2. Resistencia a compresión de los morteros con escoria blanca.

En el caso de la amasada LFS40, la perdida resistencia es muy elevada, sobre todo si comparamos las mezclas LFS30 y LFS40. El aumento en el contenido de escoria no compensa la perdida de resistencia entorno a 15 MPa que se produce, por lo que en futuros estudios se recomienda evitar sustituciones tan

elevadas. Y, en definitiva, atendiendo a los resultados de resistencias obtenidos en el presente estudio, cabe limitar la sustitución de cemento por Escoria Blanca alta en sílice al 30% .

#### 4.4 Envejecimiento acelerado

Como se ha mencionado anteriormente, uno de los mayores problemas en el uso de Escorias Blancas es la presencia de Cal libre y Magnesia libre. Estos compuestos al hidratarse se expanden, doblando su volumen inicial y, por lo tanto, cuando la escoria esté confinada en una matriz rígida, la referida expansión podría provocar fisuras o roturas de los elementos.

A resultados de lo anterior, decir cómo es necesario estudiar con detenimiento este proceso, al objeto de identificar los umbrales admisibles en el contenido de LFS alta en sílice escoria a utilizar de forma segura, sin que pueda ser perjudicial su uso para el elemento fabricado.

##### 4.1.1. Agua a 70°C

El objetivo de este ensayo consiste en medir la expansión que se puede producir en las probetas debido a la expansión de Cal libre y Magnesia libre. Además de evaluar el daño que puede causar la expansión de estos compuestos en el mortero endurecido.

En la tabla 3 se muestran los valores de expansión que han sufrido las probetas (media de dos probetas por mezcla) después de un mes sumergidas en agua a 70°C.

**Tabla 3. Expansión sufrida por las probetas sumergidas en agua a 70°C**

Mezcla	Expansión [mm/m]
LFS0	0.72
LFS10	0.68
LFS20	0.71
LFS30	0.64
LFS40	0.97

Los valores obtenidos en las mezclas LFS0, LFS10, LFS20, LFS30 son muy similares, siendo las expansiones sufridas por las probetas con escoria incluso menores que las sufridas por las probetas patrón. En cambio, las probetas LFS40 han sufrido una expansión muy superior al resto. Con estos resultados las conclusiones que se obtienen son similares a las correspondientes a

ensayos de resistencias mecánicas: la sustitución de cemento por escoria en un 40% es demasiado elevada y no se puede recomendar su uso.

##### 4.1.1. Autoclave

Al igual que en el ensayo anterior, e incluso en mayor medida, las reacciones de hidratación de la Cal y de la Magnesia libre, también se aceleran en la autoclave.

En este caso no se procede a evaluar la variación de volumen de las probetas, sino la evolución de su integridad.

En la Figura 3 podemos observar el estado de las probetas después de 803 horas en autoclave.


No hay imagen de la probeta LFS40, ya que a las 386 horas de ensayo (40% de exposición) se disgregó completamente, habiéndose ya constatado su fisuración a partir de las 340 horas.



**Figura 3. Probetas tras ensayo en Autoclave**


En la imagen se puede observar que las probetas LFS0, LFS10 y LFS20 se encuentran en perfecto estado. Las probetas LFS10 y LFS20 muestran eflorescencias superficiales, pero este es un problema estético menor siempre y cuando el mortero fabricado no sea de acabado.

En la probeta LFS30 sí se evidencian ciertas fisuras. Esta probeta estuvo en perfecto estado durante las primeras 490 horas de ensayo (60% de exposición), tras las cuales empezaron a aparecer fisuras, correspondiendo la imagen presentada en Figura 3 la de su estado actual.

En vista de los resultados obtenidos en este ensayos, el uso de escoria blanca en proporciones del 40% de sustitución del cemento queda completamente descartado. Es más, tampoco convendría recomendar el uso del 30% de sustitución. Se podrían emplear sustituciones del 10% y 20% de forma segura sin problemas aparentes, en cuanto a las reacciones de expansión se refiere 

## 5. Conclusiones

Tras fabricar 5 amasadas diferentes con sustituciones parciales en masa del cemento Portland por escoria blanca (alta en sílice) del 0%, 10%, 20%, 30% y 40%, así como realizar ensayos de consistencia, propiedades mecánicas y envejecimiento acelerado, se puede concluir que:

- El uso de la escoria blanca en mezclas hidráulicas como sustitución del cemento Portland aumenta la demanda de agua de las mezclas.
- La densidad de las mezclas fabricadas con escoria blanca o sin ella es similar.
- La resistencia, tanto a compresión como a flexotracción, de los morteros ricadas con escoria blanca son menores que la del mortero patrón. Sin embargo, en los casos de sustituciones del 10%, 20% y 30% las pérdidas no son muy acusadas, siendo el comportamiento de las muestras satisfactorio, pudiendo recomendar su uso en estas proporciones desde un punto de vista mecánico. Según los resultados obtenidos con las probetas LFS40 el uso de escoria en sustituciones mayores al 30% no es recomendable.

- En los ensayos de envejecimiento acelerado, se ha podido comprobar los problemas que causan en mezclas hidráulicas la presencia de Cal libre y Magnesia libre, procedente de la escoria blanca. En vista de los resultados obtenidos, para evitar cualquier tipo de problema con el uso de este sub-producto, no debe emplearse en proporciones superiores al 20% de sustitución de cemento. En los casos en los que esta proporción se supere no es posible asegurar la integridad a largo plazo de los morteros.

Con los ensayos realizados en este trabajo es posible plantearse la futura introducción de la escoria blanca en la norma UNE EN 197-1 como adición al cemento. La propuesta de los autores de este trabajo, a priori, sería incorporarla con las mismas condiciones que el humo de sílice, porcentaje máximo de sustitución del 10%. Sin embargo, para lograr este objetivo, es necesario seguir trabajando en esta línea y realizar campañas experimentales más extensas.

## Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a los grupos de investigación del Gobierno Vasco IT1314-19 y UPV/EHU GIU19/029, así como a la financiación de la UPV/EHU PPGA19/61. El agradecimiento se extiende al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y a los fondos por los proyectos RTI2018-097079-B-C31 (MCIU/AEI/FEDER, EU) y BU119P17 (Junta de Castilla y León). Además, a las empresas Hormor y CHRYSO por el suministro de materiales, a ERAIKER por la ayuda en la realización de ensayos y al alumno Josu San Sebastian por su ayuda en la parte experimental de este trabajo mientras realizaba su TFG.

## Referencias

[1] Baeza de los Santos, F.J., Vilaplana Abad JL, Galao Malo O, Garcés Terradillos P. Estudio de la sensibilidad a su propia deformación de escorias de alto horno activadas alcalinamente y



- reforzadas con fibra de carbono. *Hormigón y Acero* 2018;69:243-50.
- [2] Torres-Carrasco M, Alonso MM, Guarner P, Zamora A, Puertas F. Hormigones de escorias activadas alcalinamente. Comportamiento mecánico y durable. *Hormigón y Acero* 2018;69:163-8.
- [3] Polanco JA, Gonzalez JJ, Manso JM. Electric Arc Furnace Slag in Concrete. *J Mater Civ Eng* 2004;16:639-45.
- [4] Geiseler J. Use of steelworks slag in Europe. *Waste Management* 1996;16:59-63.
- [5] CEN European Committee for standardization. Rue de Stassart, 36. Brussels B-1050.
- [6] Skaf M, Ortega-López V, Fuente-Alonso JA, Santamaría A, Manso JM. Ladle furnace slag in asphalt mixes. *Construction and Building Materials* 2016;122:488-95.
- [7] <https://unesid.org/datos-series-historicas-produccion-basicas.php> . 2018.
- [8] Setién J, Hernández D, González JJ. Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material. *Constr Build Mater* 2009;23:1788-94.
- [9] Ortega-López V, Manso JM, Cuesta II, González JJ. The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soil-stabilization applications. *Constr Build Mater* 2014;68:455-64.
- [10] Rodríguez A, Manso JM, Aragón A, Gonzalez JJ. Strength and workability of masonry mortars manufactured with ladle furnace slag. *Resour Conserv Recycl* 2009;53:645-51.
- [11] Herrero T, Vegas IJ, Santamaría A, San-José JT, Skaf M. Effect of high-alumina ladle furnace slag as cement substitution in masonry mortars. *Constr Build Mater* 2016;123:404-13.
- [12] ASTM International. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, 19429-2959. PA, USA, 2008.