

MODIFICACIÓN DE LA RETRACCIÓN Y LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN HORMIGONES MEDIANTE LA ADICIÓN DE ESCORIAS DE HORNO DE CUCHARA

VÍCTOR LÓPEZ-AUSÍN¹, VÍCTOR REVILLA-CUESTA¹, MARTA SKAF²

¹*Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Burgos, España.*

{vlausin; vrevilla}@ubu.es

²*Departamento de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno, Universidad de Burgos, España.*

mskaf@ubu.es

Resumen

La disminución de la humedad en un elemento de hormigón debido a una diferencia de humedad relativa entre el medio ambiente y el elemento en sí provoca una deformación volumétrica de contracción (disminución de volumen). Este fenómeno, denominado retracción por secado, puede provocar la aparición de grietas en el hormigón, lo que a su vez puede conducir a una disminución de la resistencia y de la durabilidad del elemento estructural. Una estrategia para disminuir la retracción es la adición durante el hormigonado de escorias de horno de cuchara al presentar este tipo de escoria características expansivas. La escoria de horno de cuchara (Ladle Furnace Slag -LFS) es un subproducto de la industria acerera, por lo que su utilización para la mejora de hormigones tiene también un efecto beneficioso en el medio ambiente al eliminar residuos de la cadena de producción. Debido a que la adición de escorias conlleva una variación de las propiedades mecánicas del hormigón además de una disminución de la retracción, es conveniente evaluar de forma precisa esa modificación de las propiedades al añadir diferentes proporciones de estas escorias, de manera que se pueda establecer la cantidad óptima de LFS que puede ser añadida manteniendo las propiedades del hormigón por encima de los límites exigibles. Por ello, esta investigación evalúa la modificación de la retracción y la variación de dos propiedades mecánicas: resistencia a compresión simple y resistencia a flexión, a edades tempranas de curado, 7 y 28 días, cuando se añade una proporción de LFS del 5% y del 20%. Los resultados muestran una disminución de la retracción pero también una modificación de la resistencia a compresión simple y la resistencia a flexión según la edad contemplada y la proporción de escoria empleada.

Palabras clave: hormigón, retracción, escoria de horno de cuchara, LFS, comportamiento mecánico, sostenibilidad.

1. INTRODUCCIÓN

La disminución de la humedad en un elemento de hormigón debido a una diferencia de humedad relativa entre el medio ambiente y el elemento en sí provoca una deformación volumétrica de contracción (disminución de volumen) que se denomina retracción por secado. La retracción por secado se produce a lo largo del tiempo y siempre que haya diferencias de humedad. A consecuencia de esta disminución de volumen pueden aparecer grietas en el elemento de hormigón, lo que puede conducir a una disminución de la resistencia y de la durabilidad del elemento de hormigón, al disminuir la resistencia a la carbonatación y al ataque de cloruros del elemento de hormigón, lo que facilita la corrosión de las armaduras y la consecuente disminución de la sección de las mismas. Cuando esto ocurre, se hace necesario reparar el elemento estructural afectado o incluso, con el impacto medioambiental que ello supone, su destrucción y sustitución por un elemento nuevo. Es por ello, que cobra especial importancia validar diferentes estrategias que permitan disminuir o incluso evitar el fenómeno de la retracción para que los futuros elementos de hormigón tengan una mayor vida útil y disminuya el consumo de recursos naturales.

Si los elementos de hormigón pudiesen retraer libremente no habría fisuras [1], pero por un lado están limitados por la estructura que los rodea, lo que provoca microfisuras, y por otro tienen una limitación interna que conduce a microfisuras. Esta limitación interna se debe en primer lugar al gradiente interno de humedad en el elemento propiamente dicho y en segundo lugar a la limitación a la retracción por parte de los áridos. De hecho, el origen de la retracción está en la pasta de cemento. La presencia de áridos en el hormigón limita las deformaciones, más cuanto mayor es la relación árido/cemento, si bien aumenta con la relación agua/cemento. Cuantitativamente, la retracción por secado es de 6 a 8 veces menor en un hormigón que en la pasta de cemento. Esto se debe a que el módulo elástico de los áridos que componen el hormigón es más alto que el de la pasta de cemento. Es por ello, que si disminuimos la retracción en la pasta de cemento, conseguiremos también disminuir la aparición de microfisuras y aumentar la durabilidad.

Si bien la retracción por secado es la más importante para un hormigón convencional en el que la relación agua/cemento sea inferior a 0,4 [2] contraction takes place. In Concrete, similar movement of water occurs from its fresh to hardened state which is known as Shrinkage. The loss of water by evaporation from the surface of the freshly laid concrete (i.e. plastic state, lo más habitual, existen otras deformaciones de contracción como son la retracción autógena, que se debe a la pérdida de humedad por las reacciones de hidratación del cemento, la retracción plástica, que tiene lugar antes del endurecimiento del hormigón (durante las primeras 24 horas) y la retracción total, que incluye la retracción por secado y la retracción autógena [3]. Por ello, la retracción por

secado para un elemento no puede ser establecida sin considerar la retracción autógena del elemento.

Numerosas estrategias para disminuir o combatir la retracción han sido investigadas. Entre ellas cabe mencionar la sustitución parcial del cemento por materiales puzolánicos [4] como cenizas volantes [5], humo de sílice [6], escorias [7] ground granulated blast furnace slag (GGBFS y muchos otros [4]; la inclusión de nanomateriales basados en carbono [8]; la adición de diferentes tipos de fibras como polipropileno [9], [10], acero [11] o fibras naturales; el uso de aditivos que reduzcan la tensión superficial o aumentan la expansión, el uso de superplastificantes [12]; el control de la humedad y el curado [13]; el uso de áridos reciclados y la utilización de óxidos de sílice.

Dentro de las estrategias mencionadas anteriormente figura el uso de las escorias, entre las que se encuentran las escorias de horno de cuchara (LFS). Las LFS son un subproducto de la industria acerera generadas tras el segundo proceso de refinado del acero. Tienen una granulometría fina y una reactividad hidráulica limitada [14], pero cambian de volumen cuando son afectadas por los cambios atmosféricos [14]. Las LFS presentan en su composición química principalmente óxidos de magnesio, silicato dicálcico y cal libre, y en menor proporción aluminato de calcio. Al presentar óxidos muy similares a los del clínker, su uso como sustituto del cemento Portland se ha estudiado en varios casos.

En esta investigación se aborda el uso de las LFS como sustitutivo del árido en elementos de hormigón y agente reductor de la retracción.

2. METODOLOGÍA

Se explican a continuación los materiales utilizados, la dosificación de la mezcla y los ensayos llevados a cabo para evaluar la variación en las características del hormigón.

2.1. Materiales

Se elaboraron hormigones compuestos de agua, árido natural, cemento, aditivos y LFS en diferentes proporciones en peso respecto al árido fino.

Se utilizó cemento Portland CEM II/A-L 42,5 R, con un contenido de clínker superior al 95%. El agua se cogió de la red de suministro de la ciudad de Burgos, España, localidad donde se realizó el estudio. Además, se utilizaron dos aditivos diferentes para dotar al hormigón de la requerida trabajabilidad; en primer lugar se empleó un regulador de la viscosidad, para conservar la fluidez durante más tiempo, y en segundo lugar se añadió un plastificante que proporcionó al hormigón la fluidez requerida.

Se utilizaron dos tipos diferentes de árido natural. Por una parte, se utilizó un árido silíceo 0/32 mm y por otro lado una arena caliza 0/2 mm. El árido silíceo 0/32 mm tenía una densidad aparente de partículas igual $2,70 \text{ Mg/m}^3$, una absorción de agua en 24 h del 0,2 %, un coeficiente de los ángeles igual a

27 y un equivalente de arena del 82 %, mientras que la arena calcárea 0/2 mm tenía una densidad de partículas de $2,67 \text{ Mg/m}^3$, una absorción de agua en 24 h del 0,1 % y un equivalente de arena del 57 %.

Por último, se empleó LFS proporcionado por la empresa Hormigones y Morteros Agote, S.L.U (HORMOR), empresa dedicada a la valorización de escorias provenientes de la fabricación de acero en horno de arco eléctrico. La LFS tenía una densidad aparente de partículas igual a $2,80 \text{ Mg/m}^3$ y una absorción de agua en 24 h del 2,0 %.

La granulometría de los diferentes materiales se muestra en la Fig. 1. Puede observarse que ninguno de ellos presentó discontinuidades en su granulometría, lo cual hizo que su empleo en la elaboración de hormigón estructural fuese adecuado [15].

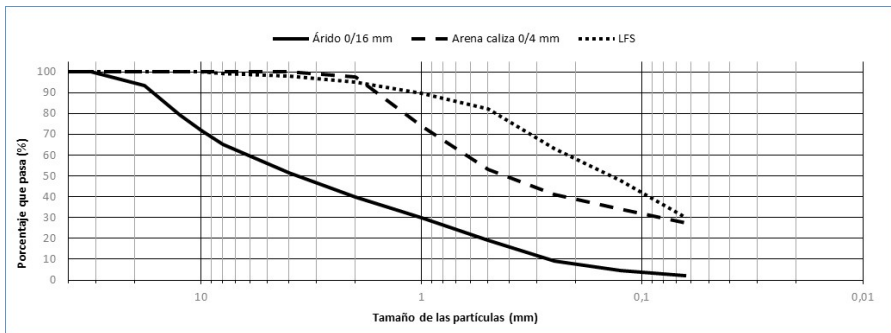


Figura 1. Granulometría de los áridos y la escoria

2.2. Dosificación del hormigón

En primer lugar, se definió la dosificación de referencia, denominada V-0, en la que no se incorporó LFS, a partir de experiencias anteriores y ajustando empíricamente la proporción de los diferentes componentes para alcanzar un hormigón con un asentamiento en torno a 70 mm. Una vez definida esta primera dosificación patrón V-0 (con un 0 % de LFS), se definieron las otras dosificaciones sustituyendo la arena caliza 0/2 mm en peso por un 5 % y un 20 % de LFS, y ajustando el contenido de agua para compensar la mayor absorción de agua de LFS y conseguir que el asentamiento permaneciese en un rango de 80 ± 15 mm. Las mezclas se denominaron V-H-5 y V-H-20 dependiendo del porcentaje de LFS añadido (el valor numérico hace referencia al porcentaje de LFS).

La dosificación de referencia de la mezcla V-0 era la siguiente: 320 kg/m^3 de cemento, 149 kg/m^3 de agua, 1750 kg/m^3 de árido natural silíceo 0/16 mm o todo-uno, 320 kg/m^3 de árido natural calizo 0/2 mm o arena, $2,0 \text{ kg/m}^3$ de aditivo regulador de viscosidad y $4,0 \text{ kg/m}^3$ de aditivo plastificante. En la mezcla V-H-5 se añadían 16 kg/m^3 de LFS, pasando a 304 kg/m^3 de

arena caliza 0/2 mm y 151 kg/m^3 de agua; mientras que en la mezcla V-H-20 se añadían 64 kg/m^3 de LFS, con 256 kg/m^3 de arena caliza 0/2 mm y 156 kg/m^3 de agua.

2.3. Plan experimental

La preparación de cada amasada de hormigón se realizó en tres fases, para así conseguir una correcta hidratación de todos los componentes de la mezcla y evitar la absorción de los aditivos por parte del árido. Las fases de amasado fueron las siguientes:

- En una primera fase se añadía todo el árido (árido natural silíceo 0/16 mm y árido natural calcáreo 0/2 mm) a la hormigonera, se activaba la rotación de la misma y a continuación se añadía lentamente la mitad del agua de amasado, previamente preparada de manera exacta, y se mezclaba todo durante 30 s. Los áridos se encontraban en condiciones de laboratorio a una humedad del 45 % y una temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$.
- A continuación en una segunda fase se añadía el cemento y lentamente el agua restante. Se mezclaba todo el conjunto durante 30 s.
- Finalmente, en una última fase se añadían los aditivos y se mezclaba durante 300 s.

Una vez finalizado el proceso de mezcla se realizaron los ensayos en estado fresco: ensayo de asentamiento densidad y contenido de aire, según las normas EN 12350-2, EN 12350-6 y EN 12350-7, respectivamente, y se elaboraban las probetas para la realización de los ensayos en estado endurecido según la norma EN 12390-2 realizando la compactación mediante una mesa vibrante. Estas probetas se dejaban curar durante 24 ± 1 horas a una temperatura de $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ y dentro de una bolsa sellada. Transcurrido ese tiempo se desmoldaban y se guardaban en cámara húmeda o en cámara de secado, según el ensayo al que se destinaban, donde continuaban el curado hasta el momento del ensayo. Según el tipo de ensayo a realizar se guardaban en diferentes condiciones:

- Las probetas sobre las que realizar ensayos de resistencia se guardaban en cámara húmeda en condiciones de humedad del $95 \pm 5 \%$ y temperatura de $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Las probetas sobre las que realizar ensayos de medida de la retracción se guardaban en cámara de secado en condiciones de humedad del $55 \pm 5 \%$ y temperatura de $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Para cada ensayo se elaboraban dos probetas de manera que los resultados se obtenían como la media aritmética de dos medidas experimentales.

Los diferentes ensayos en estado endurecido realizados junto con el tipo de probetas empleadas y las normas seguidas para cada ensayo se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Ensayos en estado endurecido. Normativa y probetas utilizadas

Ensayo	Norma	Tipo de probeta empleada
Resistencia a compresión	EN 12390-3	Probeta cilíndrica de 10x20 cm
Resistencia a flexión	EN 12390-5	Probeta prismática de 7,5x7,5x28,5 cm
Retracción	EN 12390-16	Probeta prismática de 7,5x7,5x27,5 cm

La medida de la retracción se realizó sobre dos puntos situados a lo largo del eje principal en los extremos de la probeta y se realizó dentro de la cámara de secado para no alterar las condiciones de las probetas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se exponen los resultados obtenidos tanto en los ensayos en estado fresco como endurecido.

3.1. Ensayos en estado fresco

Tras el proceso de amasado, se realizaron los ensayos en estado fresco para evaluar el asentamiento y la densidad cada mezcla. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Ensayos en estado fresco

Ensayo	V-0	V-H-5	V-H-20
Asentamiento (cm)	7,5	7,7	9,5
Densidad en estado fresco (kg/m ³)	2408,6	2414,3	2397,1

El ensayo de asentamiento permite determinar la consistencia del hormigón en estado fresco. Para su realización se utiliza el cono de Abrams, del que toma el nombre con el que es conocido coloquialmente: “ensayo del cono de Abrams”. El resultado del ensayo de asentamiento es la diferencia de altura entre la altura del cono y el de la masa de hormigón tras levantar en vertical el cono en el que estaba contenida, siempre y cuando el hormigón quede de forma aproximadamente simétrica y sin caída lateral de masa [24 EN 12350-2].

El valor de asentamiento obtenido en la mezcla V-H-5 resultó muy similar al de la mezcla patrón, no así en la mezcla V-H-20, que sin tener un asentamiento excesivo si que mostraba una menor consistencia que la muestra patrón. De acuerdo a su valor de asentamiento las tres mezclas presentaban consistencia blanda, rango 50-90 mm, por lo que se encontraban en el mismo rango.

La densidad en estado fresco de las tres mezclas fue prácticamente la misma con una desviación máxima respecto al valor promedio inferior al 0,4 % Esto muestra la adecuada preparación de cada una de las mezclas, conforme a la dosificación prevista.

3.2. Ensayos en estado endurecido

En este apartado se explican los resultados obtenidos de los ensayos en estado endurecido.

3.2.1. Resistencia a compresión

El ensayo de resistencia a compresión simple mide la tensión máxima a compresión, esfuerzo axial, que aguanta una probeta de hormigón antes de su rotura. Es la característica mecánica más importante del hormigón, tanto que la clasificación normativa de hormigones se realiza en base a la resistencia a compresión simple mínima que han de tener a 28 días.

Se ha medido la resistencia a compresión simple de las probetas a edades de 7 y 28 días, mostrando los resultados obtenidos en la Fig. 2.

Los resultados muestran una mayor resistencia de las mezclas con LFS respecto a la mezcla patrón V-0. A 7 días la mezcla V-H-5 (37,4 MPa) presenta una mayor resistencia que la mezcla V-H-20 (36,1 MPa) y esta a su vez que la mezcla patrón V-0 (34,5 MPa); mientras que a 28 días es la mezcla V-H-20 (39,9 MPa) la que presenta una mayor resistencia, con valores similares entre la mezcla V-H-5 (37,8 MPa) y la mezcla patrón V-0 (37,0 MPa).

En cuanto a la evolución con la edad, se observa que la mezcla con menor proporción de LFS presenta un comportamiento prácticamente constante, mientras que tanto la mezcla patrón como la mezcla con mayor proporción de LFS aumentan su resistencia con la edad.

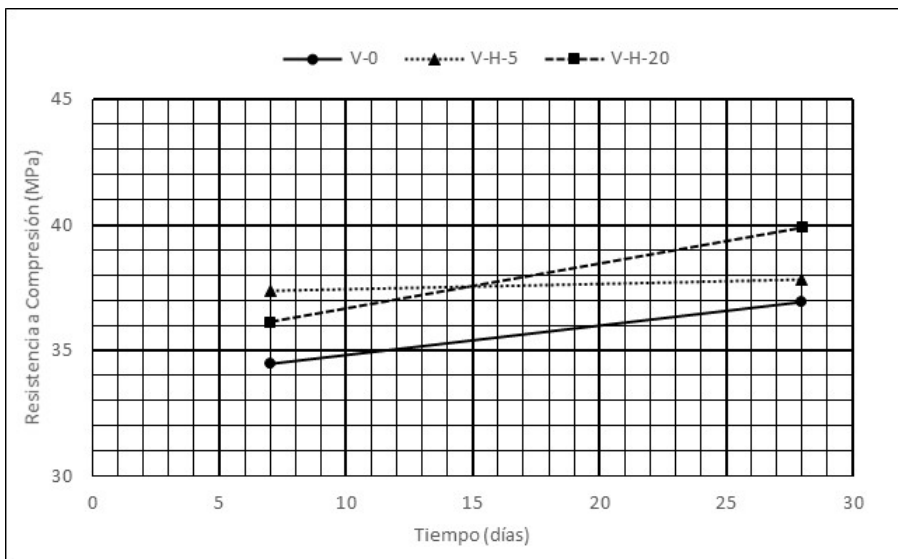


Figura 2. Resistencia a compresión a 7 y 28 días

3.2.2. Resistencia a flexión

El ensayo de resistencia a flexión mide la tensión máxima a flexión que aguanta una probeta prismática antes de su rotura, entendiéndose esta tensión como la carga por la distancia entre los apoyos inferiores de la probeta y dividido por el producto de las distancias entre los rodillos de aplicación de la carga y los rodillos de los apoyos.

Se ha medido la resistencia a flexión de las probetas a edades de 28 y 90 días, mostrando los resultados obtenidos en la Fig. 3.

La resistencia a flexión en general presenta un comportamiento similar a la resistencia a compresión. Los resultados muestran una mayor resistencia de las mezclas con LFS respecto a la mezcla patrón V-0. A 28 días la mezcla V-H-5 (6,0 MPa) presenta una mayor resistencia que la mezcla V-H-20 (5,8 MPa) y esta a su vez que la mezcla patrón V-0 (5,3 MPa); mientras que a 90 días es la mezcla V-H-20 (7,1 MPa) la que presenta una mayor resistencia, con valores similares entre la mezcla V-H-5 (6,2 MPa) y la mezcla patrón V-0 (6,3 MPa).

Las mezclas con LFS no presentan una resistencia a flexión menor que la mezcla patrón, si bien sí que se observa un cambio de tendencia con la edad, de manera que a mayor edad se obtienen mejores resultados en la mezcla con mayor proporción de LFS, mientras que a menor edad es la de menor proporción de LFS la que ofrece mejores resultados.

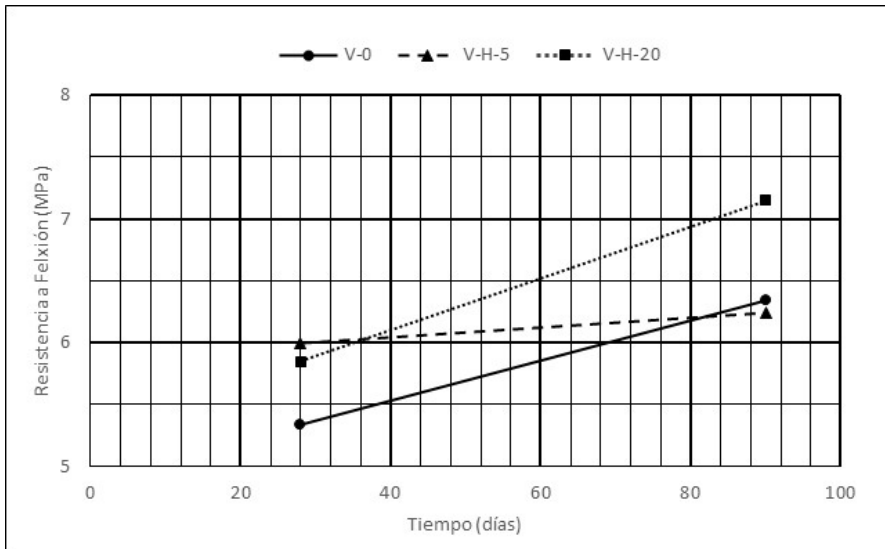


Figura 3. Resistencia a flexión a 7 y 28 días

3.2.3. Retracción

La retracción se obtuvo midiendo la diferencia de longitud de la probeta respecto a su dimensión inicial. Los resultados de retracción total, ver Fig. 4, muestran una disminución de la retracción en la mezcla V-H-5 respecto a la muestra patrón V-0, mientras que la mezcla V-H-20 muestra un aumento de la retracción respecto a la muestra patrón V-0. Esto es debido a que en pequeña cantidad, mezcla V-H-5, las LFS compensan totalmente con su expansión la mayor retracción provocada por la mayor cantidad de agua disponible, e incluso la disminuyen, mientras que en la mezcla V-H-20 no se compensa esa mayor retracción. Recordar que para mantener la trabajabilidad de la mezcla, se aumentó la cantidad de agua de amasado con el aumento de la cantidad de LFS en sustitución del árido fino.

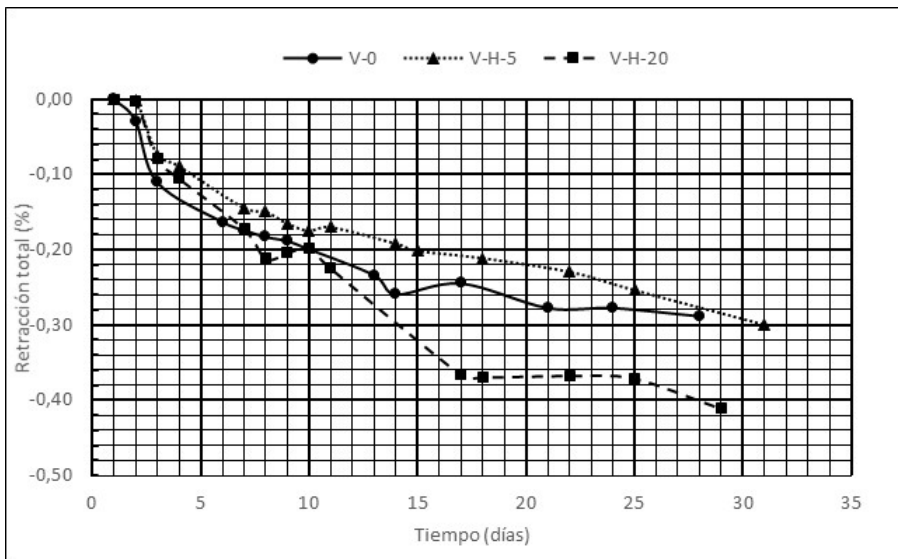


Figura 4. Retracción total en los primeros 28 a 30 días

4. CONCLUSIONES

A modo de corolario se puede indicar lo siguiente:

- La sustitución de parte del árido fino de la mezcla por LFS no ha provocado disminución de las resistencias mecánicas del hormigón.
- Una mayor adición de LFS provoca una mayor mejora de las resistencias mecánicas, tanto en compresión como en flexión. No obstante, una mayor cantidad de LFS produjo una adquisición de las resistencias más diferidas en el tiempo.
- La mezcla con un 5% de LFS presentó una rápida adquisición de las resistencias, que aumentaron muy poco en el tiempo.

- La sustitución de parte del árido fino por LFS ha mejorado la retracción si se realiza en pequeñas cantidades, con una menor disminución del volumen, pero la ha aumentado para cantidades altas de LFS.

Se concluye por lo tanto que el uso de las LFS como sustitutivo del árido en elementos de hormigón tiene un efecto beneficioso en las características mecánicas a cualquier edad, provocando un aumento de las mismas, pero su utilidad como agente reductor de la retracción es limitada ya que su uso en grandes proporciones aumenta la retracción.

REFERENCIAS

- [1] Bisschop, J. & Van Mier, J. G. M. (2002). *Drying shrinkage microcracking in cement-based materials*. Heron vol. 47.
- [2] Krishna, V. & Kumar, R. (2016). Water to cement ratio: A simple and effective approach to control plastic and drying shrinkage in concrete. *Sustain. Constr. Mater. Technol.* 2016-Augus,.
- [3] Mastali, M., Kinnunen, P., Dalvand, A., Mohammadi Firouz, R. & Illikainen, M. (2018). Drying shrinkage in alkali-activated binders – A critical review. *Constr. Build. Mater.* 190, pp. 533-550.
- [4] Tran, N. P. *et al.* (2021). A critical review on drying shrinkage mitigation strategies in cement-based materials. *J. Build. Eng.* 38, pp. 102210.
- [5] Kumar, B., Tike, G. K. & Nanda, P. K. (2007). Evaluation of properties of high-volume fly-ash concrete for pavements. *J. Mater. Civ. Eng.* 19, pp. 906-911.
- [6] Güneysi, E., Gesoğlu, M., Karaoğlu, S. & Mermerdaş, K. (2012). Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. *Constr. Build. Mater.* 34, pp. 120-130.
- [7] Zhang, W., Hama, Y. & Na, S. H. (2015). Drying shrinkage and microstructure characteristics of mortar incorporating ground granulated blast furnace slag and shrinkage reducing admixture. *Constr. Build. Mater.* 93, pp. 267-277.
- [8] Hawreen, A., Bogas, J. A. & Dias, A. P. S. (2018). On the mechanical and shrinkage behavior of cement mortars reinforced with carbon nanotubes. *Constr. Build. Mater.* 168, pp. 459-470.
- [9] Karahan, O. & Atiş, C. D. (2011). The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Mater. Des.* 32, pp. 1044-1049.
- [10] Zhang, P. & Li, Q. F. (2013). Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume. *Compos. Part B Eng.* 45, pp. 1587-1594.
- [11] Wu, Z., Shi, C. & Khayat, K. H. (2019). Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape. *Compos. Part B Eng.* 174, pp. 107021.

-
- [12] Hu, X. *et al.* (2017). Drying shrinkage and cracking resistance of concrete made with ternary cementitious components. *Constr. Build. Mater.* 149, pp. 406-415.
- [13] Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A., Cimentada, A. I. & Medina, C. (2018). Influence of curing conditions on recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 172, pp. 618-625.
- [14] Manso, J. M., Ortega-López, V., Polanco, J. A. & Setién, J. (2013). The use of ladle furnace slag in soil stabilization. *Constr. Build. Mater.* 40, pp. 126-134.
- [15] Revilla-Cuesta, V., Ortega-López, V., Skaf, M. & Manso, J. M. (2020). Effect of fine recycled concrete aggregate on the mechanical behavior of self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.* 263, pp. 120671.