

HORMIGÓN LIVIANO AUTOCOMPACTADO DE ALTA RESISTENCIA REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO. ANÁLISIS DEL AVANCE EN EL DESARROLLO DEL DISEÑO DE MEZCLAS

Alberto José Palacio¹, Bárbara Belén Raggiotti², Viviana Carolina Rougier³

¹ Grupo de Investigación de Ingeniería Civil Materiales y Ambiente (GIICMA), UTN FRCon, Concordia, Entre Ríos, apalacio@frcon.utn.edu.ar.

² Centro de Investigación Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad (CINTEMAC), UTN FRC, Ciudad Universitaria, Córdoba Capital, belenraggiotti@gmail.com.

³ Grupo de Investigación en Mecánica Computacional y Estructuras (GIMCE), UTN FRCU, Concepción del Uruguay, Entre Ríos; rougierv@frcu.utn.edu.ar

RESUMEN

En los últimos años en el campo de la investigación ha ganado popularidad la utilización de agregados livianos en hormigón autocompactante. Por otro lado, la fabricación de hormigones de alta resistencia reforzados con fibras y más recientemente hormigones autocompactantes reforzados con fibras de acero dan lugar a nuevas alternativas de aplicación, entre las que se destacan la realización de reparaciones y refuerzos. Este trabajo analiza investigaciones recientes sobre las propiedades físicas de los agregados livianos utilizados en el desarrollo del diseño de mezcla de concreto alivianado autocompactante de alta resistencia reforzado con fibras de acero (HLAARFA). Además, busca resumir la discusión sobre la proporción de mezcla en el diseño del HLAARFA, el cual es un factor crucial para lograr las propiedades deseadas en este nuevo material estructural. Se revisan diversos métodos para desarrollar el diseño de mezclas que cumplan satisfactoriamente con los requisitos tanto en estado fresco como endurecido.

Palabras claves: hormigón liviano autocompactante, fibras de acero, alta resistencia, agregados livianos, dosificación.

INTRODUCCIÓN

Los avances de la tecnología del hormigón, han llevado a producir nuevos materiales de alto rendimiento que posean los beneficios y características apropiadas para reforzar los elementos estructurales de hormigón armado. Se ha desarrollado el hormigón liviano autocompactante (HLAC), que combina las propiedades de autocompactabilidad como de baja densidad mediante el reemplazo de agregados de peso normal (AN) por agregados livianos (AL) en el hormigón autocompactante (HAC).

Para el comité de la American Concrete Institute (ACI), el hormigón estructural liviano (HL) es el hormigón que tiene a los 28 días una resistencia a la compresión de 17 MPa y densidad de 1120-1920 kg/m³, constituido total o parcialmente por AL, mientras que los hormigones livianos de alta resistencia (HLAR) tienen a los 28 días una resistencia a la compresión superior a 40 MPa [1].

En este trabajo se analizan varias investigaciones recientes que estudian las propiedades físicas de los AL utilizados en el desarrollo de mezclas de HLAARFA. Además, busca resumir la discusión sobre el diseño de estas mezclas, el cual es un factor crucial para lograr las propiedades deseadas en el estado fresco y endurecido. Se revisan los métodos de dosificación para desarrollar mezclas que cumplan satisfactoriamente con requisitos como capacidad de llenado, capacidad de paso, resistencia a la segregación y resistencia a la compresión.

Por lo tanto, el objetivo principal de este documento es revisar diversos trabajos en los que se han utilizado AL para el desarrollo de hormigones estructurales, identificando las propiedades físicas y el efecto de su uso en las mezclas de HAC.

HORMIGÓN LIVIANO DE ALTA RESISTENCIA AUTOCOMPACTADO Y REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO

Debido a que, al igual que el hormigón convencional, el HAC es de naturaleza frágil, diversos investigadores han trabajado en el desarrollo de su ductilidad o tenacidad estructural, introduciendo diferentes tipos de fibras pequeñas y discretas, obteniendo el HAC reforzado con fibra (HACRF) con características de rendimiento mejoradas. Sin embargo, el empleo de fibras puede reducir la capacidad de fluidez y capacidad de paso, por lo que se necesitan ensayos para establecer el tipo, la longitud y la cantidad óptimos para otorgar todas las propiedades requeridas del material. Se han realizado estudios relevantes para caracterizar experimentalmente los HLAC y HACRF en estados frescos y endurecidos sin embargo la literatura sobre HLAC reforzado con fibra (HLACRF) todavía tiene un déficit de información.

El desarrollo del hormigón liviano de alta resistencia autocompactado y reforzado con fibras de acero – HLAARFA (SHLSCC, por sus siglas en inglés) promete buenas perspectivas y está ganando popularidad en el refuerzo de estructuras de hormigón armado a los efectos de mejorar su resistencia a flexión [2]. Por lo que tener un conocimiento claro y actual de los agregados livianos utilizados y las metodologías empleadas para desarrollar el diseño de mezcla HLAARFA, es de gran importancia para lograr este tipo de material con prometedoras prestaciones.

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Agregados livianos

Los agregados livianos se pueden clasificar en naturales y artificiales. Los AL naturales comunes son la piedra pómez, diatomea, cenizas volcánicas, escoria y toba. Mientras que los desechos industriales y materiales naturales procesados como la pizarra sinterizada, la ceniza volante y la escoria de alto horno expandida, son algunos AL artificiales [3]. Además, se procesan materiales naturales como el esquisto, la arcilla expandida, la pizarra, la vermiculita y la perlita que se pueden usar como AL en la fabricación de hormigón [4]. También se ha empleado poliestireno expandido para producir hormigón ligero, con una amplia gama de densidades y se estudiaron los efectos de su uso en las propiedades de los HLACRF [5].

Las proporciones en la mezcla de HLAARFA y su rendimiento correspondiente en términos de estados frescos y endurecidos dependen en gran medida de las propiedades físicas de los AL incorporados. Los más utilizados en hormigones estructurales son la piedra pómez o pumicita, el esquisto expandido y la arcilla expandida, por lo cual, en este documento se presentan resultados de diversas investigaciones en las que se emplean estos tipos de AL (ver Figura 1).

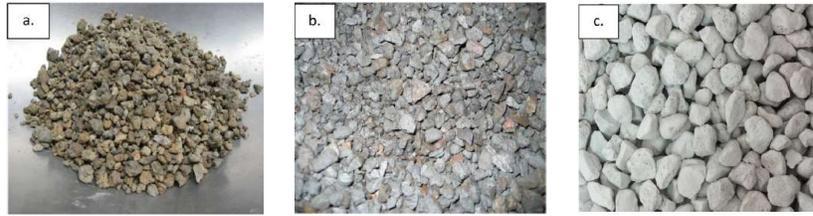


Figura 1: Agregados livianos: a) Arcilla expandida b) Esquisto expandido c) Pumicita.

Particularmente el peso específico del AL utilizado puede afectar una de las principales características a controlar que es la densidad del hormigón resultante. Según investigaciones realizadas por varios investigadores, se observa que los AL de densidad menor a 2 g/cm^3 se usan para producir hormigón liviano (HL) de densidad inferior a 1920 kg/m^3 [4]. La densidad de los agregados de piedra pómez se encuentra, en general, dentro del rango de $0,69\text{--}1,84 \text{ g/cm}^3$ [6], [7]. Para los agregados de esquisto expandido, los valores de densidad están en el rango de $1,33\text{--}1,35 \text{ g/cm}^3$ [4]. Los agregados de arcilla expandida tienen una densidad de $0,42\text{--}1,78 \text{ g/cm}^3$. Por el momento, Goi et al. [8] encontraron la densidad específica más baja de $0,42 \text{ g/cm}^3$ de los agregados de arcilla expandida, mientras que Shanker [9] encontró la más alta de $1,75 \text{ g/cm}^3$. Esta inconsistencia de densidad se puede deber a las diversas fuentes de suministro, así como a las diferentes formas del proceso industrial.

Los AL generalmente se producen en diversas formas y tamaños de partículas y su análisis granulométrico es crucial para verificar el cumplimiento de los requisitos de diseño, control de producción y especificaciones. Debido a que dependen del tipo de producción y origen, las distribuciones granulométricas son muy variables. Un ejemplo típico de curvas granulométricas de piedra pómez, esquisto y arcilla expandida se muestra en la Figura 2 [4]. En ella se observa que, para algunos casos, los agregados de piedra pómez poseen una mejor curva de distribución de partículas que los agregados de esquisto expandido y arcilla expandida. El uso de agregados bien graduados minimizará los vacíos, lo que conduce a una óptima trabajabilidad y resistencia, por lo cual es un factor importante en el diseño del HLAARFA.

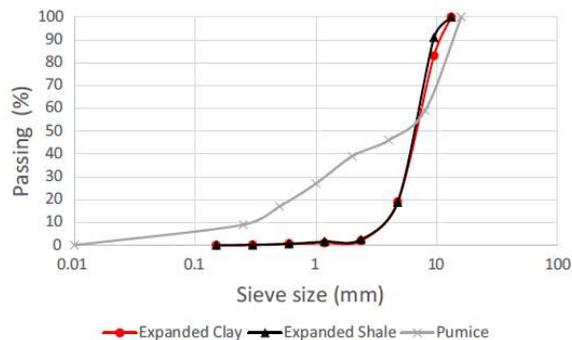


Figura 2: Distribución típica del tamaño de partícula de AL. Fuente: Ting et al. 2019 [4]

Dado que el AL generalmente está presente en forma angular y escamosa [10], la mayoría de los investigadores han limitado el tamaño máximo (TM) de los agregados gruesos hasta 12,5 o 16 mm. Se recomienda el uso de agregados gruesos con un TM de 10 mm, ya que puede producir HAC de mayor resistencia que la producida mediante el uso de agregados gruesos de un mayor tamaño [4]. Además, estas características pueden reducir la relación superficie/volumen para minimizar el cemento utilizado y lograr una mejor trabajabilidad vinculado a un menor costo.

Dependiendo de la estructura celular del AL, también puede llevar más tiempo alcanzar la condición de saturado superficie seca (SSS), previamente a la elaboración de las mezclas

[11]. Según los trabajos observados [4], [11], [12], la absorción de agua durante 24 horas de estos tres agregados está en el rango de 5-80 %, siendo la piedra pómez la de mayor capacidad de absorción. La alta absorción de agua puede causar pérdida de trabajabilidad cuando se usa como condición seca durante la elaboración y la condición saturada puede alterar en gran medida la relación a/c utilizada, lo que dará como resultado una baja resistencia a la compresión del hormigón [12]. A la luz de la considerable influencia de la absorción de agua, los AL deben humedecerse previamente y permitir que alcancen la condición de SSS para evitar la pérdida de agua. Por otro lado, el agua presente en estos puede reducir la contracción plástica debido a condiciones de secado desfavorables y proporciona un curado interno que permite una hidratación más completa del cemento [13].

Fibras

Se emplean fibras estructurales de acero para modificar la ductilidad/tenacidad del hormigón endurecido. Su longitud y cantidad se seleccionan según el tamaño máximo del agregado y los requisitos estructurales [14]. Las fibras tienen como fin reforzar la masa del hormigón disminuyendo la fisuración y aumentando la tenacidad mediante la transmisión de esfuerzos a través de la sección fisurada, además mantienen la fisuración del material en niveles muy bajos, utilizando la cantidad y el tipo de fibra adecuados. Por otro lado la adición de fibras disminuye los efectos de la retracción por fraguado y aumenta la resistencia al impacto y la resistencia a la fatiga [15]. Olivitto y Zuccarello [16] observaron que la adición de fibras de acero al hormigón aumenta la ductilidad, la primera resistencia a la fisura y la resistencia a la flexión, mientras que la resistencia a la compresión del hormigón se ve menos afectada. Además, se puede inducir en los hormigones un comportamiento tenaz "pseudo strain-hardening" con un volumen de fibras por encima de un valor crítico necesario.

De una manera general se pueden clasificar como fibras estructurales, aquellas que proporcionan una mayor energía de rotura al hormigón en masa, y como fibras no estructurales, a aquellas que sin considerar en el cálculo esta energía suponen una mejora ante determinadas propiedades como el control de la fisuración por retracción, incremento de la resistencia al fuego, abrasión, impacto, entre otros. De acuerdo con su naturaleza las fibras se clasifican en fibras de acero, fibras poliméricas y fibras orgánicas [17]. Las fibras de acero (torsionadas, de gancho, rectas largas y cortas) se usan regularmente en mezclas de hormigones de alta performance debido a su alta resistencia, durabilidad en ambientes alcalinos y alto módulo de elasticidad [18] (ver Figura 3).

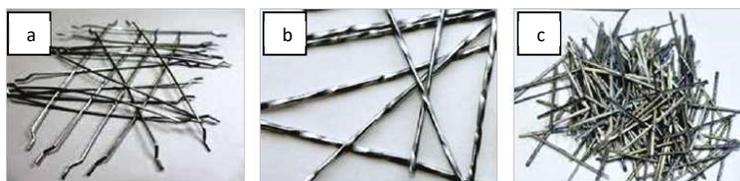


Figura 3: Fibras de acero normalmente utilizadas en hormigones estructurales a) De extremo con gancho b) Torsionadas c) Rectas.

DISEÑO DEL HLAARFA

Aunque muchos investigadores han desarrollado y propuesto varios métodos de diseño para distintos tipos de HAC basados en teorías científicas y expresiones empíricas, en este momento, no existe un método estandarizado para obtener el diseño de mezcla de estos hormigones. Para la obtención del HLAARFA, en general se aplican las metodologías de diseño del HAC, evaluando sus características mecánicas (resistencia y tenacidad) y los requisitos en los términos de fluidez, capacidad de pasaje y resistencia a la segregación mediante los ensayos típicos de HAC. Debido a esto, en la siguiente sección se presentará

la revisión del método de diseño de mezcla de los HLAC y los HACRF como base para considerar un posible método de dosificación del HLAARFA.

Dosificación del HLAC

Para desarrollar el diseño de HLAC, Shi et al. [19] adoptaron la combinación del mínimo volumen de vacío para la mezcla de agregados, la teoría del exceso de pasta y las recomendaciones de ACI 211 [20]. La teoría del exceso de pasta se usa para determinar la cantidad mínima de pasta requerida para llenar el vacío entre los agregados, permitiendo que el HAC fluya con fricciones mínimas entre los agregados, así como para equilibrar la mezcla por la cantidad de agua retenida. Logrando el menor volumen de vacíos para una relación de volumen entre agregados gruesos y finos dada, se ajusta la densidad, y en función de la resistencia a la compresión, se determina el contenido de cemento y la relación a/c a partir de ACI 211. Se fija el valor determinado del contenido de cemento, mientras que el exceso de pasta, que depende del tipo de agregado, se produce a partir de adiciones minerales como las cenizas volantes. La trabajabilidad se ajusta variando la dosis de aditivos superplastificantes.

Kaffetzakis y Papanicolaou [21] propusieron otro método de dosificación de HLAC basado en el concepto de punto óptimo de empaquetamiento y criterios de trabajabilidad. Este método implica la investigación del material a través de la fase de pasta, mortero y hormigón. Se considera que el menor volumen vacío de mezcla corresponde a la fluidez óptima tanto en pasta como en mortero, por lo tanto se determina el menor volumen de vacíos en las mezclas cementíceas con distintas relaciones a/c. Luego se dosifica el hormigón a partir de la densidad aparente y tipo del agregado mediante una ecuación empírica. Se emplea un análisis estadístico que proporciona un hormigón en base a los requerimientos de resistencia, densidad y trabajabilidad. Sin embargo, este método sólo se limita al uso de ciertos materiales cementíceos y agregados de piedra pómez.

Nepomuceno et al. [22] modificó un método de diseño de HAC de peso normal y propuso una metodología que se basa en el estudio reológico de la fase de mortero y su combinación con agregados gruesos livianos. Esta metodología implica la caracterización de los materiales constituyentes y la determinación de la relación volumétrica de los agregados a partir de una curva de referencia. El contenido de material cementíceo, agua y aditivos se determinan experimentalmente en la fase de mortero a través de un proceso iterativo de evaluación de capacidad de flujo. Estas propiedades de flujo del mortero deben ser capaces de prevenir la segregación dinámica y estática de los AL.

De los trabajos estudiados se observa que las metodologías presentadas para el diseño de mezclas de HLAC se basan en el principio de empaquetamiento del agregado para determinar el mínimo vacío producido por los AL, así como para determinar la relación óptima de agregados gruesos y finos que produzca la menor densidad de HLAC. Además, la relación entre agregados gruesos y finos utilizada generalmente está en el rango de 0,5 a 0,6, siendo la proporción de 0,6 la más recomendada, ya que resulta ser la más favorable.

Dosificación del HACRFA

Barragán et al. [23] aplicaron una metodología de diseño de HAC para la obtención de un HACRFA, evaluando sus características mecánicas en relación con el comportamiento típico de un hormigón con fibras convencional. Se considera al hormigón como un material con dos fases, la pasta y el esqueleto granular, a optimizar individualmente. En primer lugar se define la dosis óptima de superfluidificante utilizando el cono de Marsh y la relación filler/cemento mediante el uso del Mini slump. Posteriormente se determina la proporción óptima de fino-grueso que origina el menor contenido de vacíos y en base a esto, el volumen de pasta necesario. Una vez conseguida la fluidez buscada se agregan las

distintas dosis de fibras de acero midiendo las propiedades en estado fresco y realizando los ajustes necesarios.

Voigt et al. [24] propusieron una fórmula para calcular el grosor promedio de la capa de matriz que envuelve las fibras y las partículas de agregado sobre la base del concepto multifacético. El volumen de huecos se obtiene utilizando la densidad de empaquetamiento de la mezcla de agregados y fibras, que se puede determinar por ASTM C 29 [25]. A partir de ello se puede calcular un espesor promedio de la fase pasta que cubre todos los componentes del esqueleto en función del volumen, el área de superficie total y los vacíos de la primera fase. Finalmente, mediante una ecuación matemática se determina el grosor promedio de la capa de mortero. Khayat et al. [26] emplearon el concepto multifacético propuesto por Voigt et al. [24] e incluyeron la reducción del volumen de agregado grueso con la adición de fibras para mantener un espesor fijo de la capa de mortero sobre las fibras y los agregados gruesos. Dedujeron que para un tipo de fibra dado, a medida que se aumenta su volumen, el valor de la capa de mortero se mantiene reduciendo el contenido de agregado grueso y realizando otros ajustes como el contenido de arena para mantener una fluidez similar en el HACRF.

Saak et al. [27] desarrollaron la "reología del modelo de pasta" para diseñar HAC. Mediante la determinación de una relación entre la tensión umbral de flujo y la viscosidad de la pasta que evite la segregación de los agregados en condiciones estáticas y dinámicas. Y mediante el cálculo de un espaciado entre agregados, que es función del diámetro promedio de las partículas, se puede obtener el volumen de pasta para lograr la trabajabilidad requerida. A partir de este método, Ferrera et al. [28] extendieron la reología del modelo de pasta a hormigones reforzados con fibra donde el diámetro promedio de las partículas de esqueleto sólido incluye los agregados gruesos, los agregados finos y las fibras. Para este cálculo se desarrollaron ecuaciones donde se consideran el tipo y dimensiones de las fibras a emplear.

De las investigaciones presentadas, se observa que, al igual que en el HLAC, para el diseño de estos hormigones se determina la proporción óptima de fino-grueso que determina el menor contenido de vacíos, se le adiciona la fibra y luego, se aplica la pasta para llenar los vacíos, que se puede determinar mediante la teoría del exceso de pasta o el estudio reológico de la pasta de cemento o el mortero.

Dosificación del HLAARFA

Con respecto al HLAARFA, si bien aún no se han desarrollado metodologías generales de dosificación, cada vez son más las investigaciones con la intención de obtener el conocimiento sobre este material, cuyo uso promete aumentar considerablemente en los próximos años. Entre los trabajos con este objetivo se pueden mencionar el de Klein et al. [29] quienes presentaron diferentes composiciones de HLACRF empleando fibras de poliéster y de acero y obtuvieron un HLACRF óptimo con una densidad de 1665 kg/m³, un flujo de asentamiento de 605 mm y una resistencia a la compresión de 22,3 MPa a 28 días para la rehabilitación de una estructura real. Iqbal et al. [30] investigaron el efecto del cambio en el contenido de fibras y micro fibra de acero en las propiedades de los HLAAR. Prepararon mezclas con diferentes contenidos de fibra para estudiar el cambio en sus propiedades frescas y endurecidas. Los resultados muestran que un HLAARFA puede desarrollarse con un flujo de asentamiento de más de 600 mm, una densidad de alrededor de 1700 kg/m³ y una resistencia a la compresión en el rango de 60 MPa.

Grabois et al. [31] realizaron la caracterización experimental integral sobre el estado fresco y endurecido de cuatro mezclas de HLAARFA. Concluyeron que la extensión de flujo presentada por todas las mezclas cumplieron con las especificaciones HAC de peso normal aunque las pruebas de embudo "V", las mezclas reforzadas con fibra tardaron demasiado

en fluir. Sus mezclas no presentaron segregación y se obtuvo una densidad inferior a 1920 kg/m^3 , lo que las clasifica como hormigón estructural ligero.

Se observa que en estos estudios, para obtener la dosificación de los HLAARFA, se realizan pruebas iterativas, donde se elaboran distintas mezclas desde pastas hasta hormigones. De esta manera se busca evaluar la compatibilidad entre los materiales disponibles, definir las dosis de aditivos, materiales cementantes, agregados y agua, y lograr características autocompactantes en el hormigón. Una vez ajustada la dosificación se determina la dosis máxima de cada tipo de fibra que permita obtener una capacidad de paso aceptable para un hormigón autocompactante.

CONCLUSIONES

La utilización de agregados livianos en HLAARFA se revisa en base a publicaciones recientes. Se observa que diferentes AL exhiben diferentes densidades, granulometrías, características de forma, densidad aparente y capacidad de absorción de agua que conducen a diferentes rendimientos de HLAARFA. Sin embargo, en base a los resultados de estas investigaciones, se puede concluir que este material puede aplicarse para el fortalecimiento de elementos estructurales.

También en función de la literatura consultada, la mayoría de las especificaciones de mezclas de HLAARFA se basan en procesos empíricos, basados en prueba y error, adecuados a un campo específico de investigación, ya que la mayoría de los métodos propuestos no son adecuados para usarse una vez que se cambia el requisito de aplicación. Se requiere un trabajo intensivo de laboratorio para obtener la información necesaria y la mayoría de las metodologías propuestas no pueden proporcionar un único diseño de mezclas en función del rendimiento requerido, como los criterios de trabajabilidad especificados y los criterios de resistencia a la compresión.

Esta revisión permitió conocer parte del amplio marco de metodologías de diseño de mezclas, en las cuales se considera el método de empaquetado agregado y fibras, que establece la relación entre el volumen de sólidos y el volumen de pasta; como un método posible para el diseño de HLAARFA. Además se evidencia que se requiere un mayor análisis de datos estadísticos para simplificar y producir una metodología de diseño única de estos hormigones especiales basada en el rendimiento, las características específicas de los materiales a emplear y las especificaciones de diseño.

REFERENCIAS

- [1] American Concrete Institute "ACI Committee Report 213R-03 structural lightweight aggregate concrete.", 2003.
- [2] Holschemacher K, Müller T, Kieslich H, "Flexural behavior of high-strength concrete with combined steel fiber and bar reinforcement", Proceedings of the International Seminar on Advanced Concrete Technology and its Applications, (2014), 45–51.
- [3] IRAM 1567:2008. Norma argentina: Agregados livianos para hormigón estructural. (2008). Tercera edición. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- [4] Ting TZH, Rahman M., Lau HH, Ting MZY, "Recent development and perspective of lightweight aggregates based self-compacting concrete", Construction and Building Materials 201, (2019), 763–777.
- [5] Chen B, Liu J, "Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber", Cement and Concrete Research, 34, (2004), 1259–1263.
- [6] Andiç-Çakır Ö, Hızal S, "Influence of elevated temperatures on the mechanical properties and microstructure of self consolidating lightweight aggregate concrete", Constr. Build. Mater., 34, (2012), 575–583, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.088>.
- [7] Topçu IB, Uygunog lu T, "Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC)", Constr. Build. Mater, 24 (7), (2010), 1286–1295.

- [8] Gopi R, Revathi V, Kanagaraj D, "Light expanded clay aggregate and fly ash aggregate as self curing agents in self compacting concrete", *Asian J. Civ. Eng. (BHRC)*, 16 (7), (2015), 1025-1035.
- [9] Shanker M, "Experimental investigation on self compacting concrete using light weight aggregates", *Int. J. Adv. Sci. Eng. Res.*, 1 (1), (2016).
- [10] Khaleel OR, Al-Mishhadani SA, Abdul Razak H, "The effect of coarse aggregate on fresh and hardened properties of self-compacting concrete (SCC)", *Procedia Eng.*, 14, (2011), 805–813.
- [11] Peters M, "Mechanical properties of Lightweight Aggregate Concrete", *EuroLightcon*, (1999).
- [12] Liu X, Chia KS, Zhang M-H, "Water absorption, permeability, and resistance to chloride-ion penetration of lightweight aggregate concrete", *Constr. Build. Mater.*, 25 (1), (2011), 335–343.
- [13] Pierce K, "Performance of lightweight aggregate in self consolidating concrete" in: Paper presented at the Masters Abstracts International, (2007).
- [14] EFNARC. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use, SCC 028, May (2005).
- [15] Rodríguez Lozano JJ, Segura Vicent E, "Análisis comparativo del efecto de los distintos tipos de fibras en el comportamiento post fisura del hormigón reforzado con fibras.", Proyecto final de grado. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, (2013), 1–88.
- [16] Olivito RS, Zuccarello FA, "An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete", *Composites Part B: Engineering*, 41(3), (2010), 246–255.
- [17] Anejo 14 EHE, Recomendaciones para la utilización de Hormigones con Fibras, (2008).
- [18] Buttignol TE, Sousa JL, Bittencourt TN, "Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC): a review of material properties and design procedures", *IBRACON Structures and Materials Journal*. Volume 10, Number 4, (2017), p. 957–971, ISSN 1983-4195
- [19] Shi C, Wu Z, Lv K, Wu L, "A review on mixture design methods for selfcompacting concrete", *Constr. Build. Mater.*, 84, (2015), 387–398.
- [20] A.C., Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI.2-91), (1992).
- [21] Kaffetzakis MI, Papanicolaou CG, "Mix Proportioning method for lightweight aggregate SCC (LWASCC) based on the optimum packing point concept", in *Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction*, Springer, (2012), 131–151.
- [22] Nepomuceno MC, Pereira-de-Oliveira L, Pereira SF, "Mix design of structural lightweight self-compacting concrete incorporating coarse lightweight expanded clay aggregates", *Constr. Build. Mater.*, 166, (2018), 373–385.
- [23] Barragán B, Giaccio G, Soriano M, Zerbino R, "Desarrollo y caracterización de hormigones autocompactables reforzados con fibras de acero", CD 15 Reunión Técnica AATH, (2003), Trabajo T-53.
- [24] Voigt T, Bui Van K, Shah SP, "Drying Shrinkage of Concrete Reinforced with Fibers and Welded-Wire Fabric". *ACI Materials Journal*, Title no. 101-M26, (2004), 233–241.
- [25] ASTM 29/C 29M-97 Standard "Test method for unit weight and voids in aggregate", *Annual Book. Section 4: Construction; vol. 04.02, Concrete and Aggregates*, (1999), 1-4.
- [26] Khayat K H, Kassimi F, Ghoddousi P, "Mixture Design and Testing of Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete", *ACI Materials Journal*, Title No. 111-M13, (2014), 143-151.
- [27] Saak AW, Jennings HM, Shah SP, "New methodology for designing self-compacting concrete", *ACI Materials Journal*, 98 (6), (2001), 429–439.
- [28] Ferrara L, Park YD, Shah SP, "A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research*, 37 (2007), 957–971.
- [29] Klein NS, De la Fuente A, Aguado A, Maso D, "Lightweight self-compacting concrete reinforced with fibres for slab rehabilitation", *Mater. Construcc.*, (2011), 61 239–256.
- [30] Iqbal S, Ali A, Holschemacher K, Bier T A, "Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC)", *Construction and Building Materials*, 98, (2015), 325–333.
- [31] Grabois TM, Chagas Cordeiro G, Dias Toledo Filho R, "Fresh and hardened-state properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers", *Construction and Building Materials* 104, (2016), 284–292.