

# Avance en el desarrollo de diseño de mezclas de hormigón liviano autocompactado de alta resistencia reforzado con fibras de acero.

Advancement in the development of steel fiber reinforced, high-strength, lightweight self-compacted concrete mix design.

Presentación: 06/10/2020

Doctorando:

**Alberto José Palacio**

Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad (CINTEMAC), Grupo de Investigación de Ingeniería Civil Materiales y Ambiente (GIICMA), Facultad Regional Córdoba. Universidad Tecnológica Nacional - Argentina.  
apalacio@frcon.utn.edu.ar

Director/es:

**Bárbara Belén Raggiotti.**

Co-director/es:

**Viviana Carolina Rougier.**

## Resumen

Este documento hace una revisión de los avances recientes en el desarrollo del diseño de mezcla de hormigón alivianado autocompactante de alta resistencia reforzado con fibras de acero (HLAARFA). El HLAARFA se define como un nuevo material, con propiedades únicas (baja densidad, autocompactabilidad, buena ductilidad y alta capacidad de resistencia a compresión con una mayor tenacidad) en comparación con el hormigón convencional. Es importante conocer las propiedades tanto materiales como mecánicas para aprovechar al máximo sus excelentes cualidades para aplicaciones estructurales, como la realización de reparaciones y refuerzos. Sin embargo, dado que este es un material nuevo, los reglamentos de diseño actuales deben revisarse antes de aplicarse a HLAARFA. Se revisan los métodos para desarrollar el diseño de mezclas de estos hormigones, factor crucial para lograr las propiedades deseadas en estado fresco y endurecido. Las observaciones de diversos trabajos muestran que el diseño de la mezcla del HLAARFA puede ser proporcionado por el concepto de empaque de agregados y fibras. Se revisan los métodos para desarrollar el diseño de mezcla que cumpla con requisitos como la capacidad de llenado satisfactoria, capacidad de paso, resistencia a la segregación y resistencia a la compresión. Este trabajo forma parte de un proyecto de tesis doctoral en progreso que tiene por objeto estudiar el comportamiento mecánico del HLAARFA, con el empleo de materiales y sistemas de fabricación utilizados en nuestra región, como una opción técnica y económicamente posible.

**Palabras clave:** Hormigón liviano autocompactante, Fibras de acero, Alta resistencia, Agregados livianos, Dosificación

## Abstract

This document reviews recent advances in the development of the Steel Fiber Reinforced High Strength Self Compacting Lightweight Concrete Mix (HLAARFA) design. HLAARFA is defined as a new material, with unique properties (low density, self-compacting, good ductility and high compressive strength capacity with higher toughness) compared to conventional concrete. Knowledge of both material and mechanical properties is important to take full advantage of its excellent qualities for structural applications, such as performing repairs and reinforcement. However, since this is a new material, current design regulations should be reviewed before applying to HLAARFA. The methods for developing the design of mixtures of these concretes are reviewed, a crucial factor to achieve the desired properties in the fresh and hardened state. An observation from various works shows that the design of the HLAARFA mixture can be provided by the concept of packaging of aggregates and fibers. Methods are reviewed to develop the mix design that meets requirements such as satisfactory filling capacity, throughput,

resistance to segregation, and resistance to compression. This work is part of a doctoral thesis project in progress that aims to study the mechanical behavior of HLAARFA, with the use of materials and manufacturing systems used in our region, as a technically and economically possible option.

**Keywords:** Lightweight self-compacting concrete, steel fiber, high strength concrete, lightweight aggregates, mix design.

## Introducción

Los logros en la tecnología moderna del hormigón han llevado al empleo del hormigón liviano (HL) y el hormigón autocompactante (HAC) como materiales trabajables y reductores de masa estructural. En los últimos años, se han realizado algunos esfuerzos para combinar las ventajas de estos dos tipos de hormigón logrando el hormigón liviano autocompactante (HLAC), que posee las propiedades tanto de de autocompactabilidad como baja densidad al reemplazar los agregados de peso normal (AN) por agregados livianos (AL) en su elaboración. Para el comité de la American Concrete Institute (ACI), el hormigón estructural liviano (HL) es el hormigón que tiene a los 28 días un resistencia a la compresión de 17 MPa y densidad de 1120-1920 kg/m<sup>3</sup>, constituido total o parcialmente por AL, mientras que los hormigones livianos de alta resistencia tienen a los 28 días una resistencia a la compresión de más de 40 MPa (ACI 213R-03, 2003).

El uso de hormigón liviano es extremadamente importante para reducir las cargas adicionales en caso de renovación o fortalecimiento de las estructuras existentes. Por otro lado, la autocompactación evita el uso de vibraciones para la compactación del hormigón, y además, la adición de fibras discretas de acero de alta resistencia resulta en una mejor ductilidad y mayor capacidad de carga resistente. Por lo tanto, un hormigón liviano de alta resistencia autocompactado y reforzado con fibras de acero, HLAARFA, podría ser utilizado para reforzar elementos de hormigón armado a los efectos de mejorar su resistencia a flexión (Holschemacher et al., 2014).

Existe una amplia gama de publicaciones sobre HL con diferentes AL y proporciones de mezcla. Sin embargo, el HLAC reforzado con fibra (HLACRF) es un tema completamente nuevo en la industria de la construcción y, por lo tanto, ha atraído un creciente interés de investigación, especialmente durante la última década. Se han realizado estudios relevantes para caracterizar experimentalmente el HLAC en estados frescos y endurecidos, sin embargo la literatura sobre HLACRF todavía tiene un déficit de información. Por otro lado, debido a las ventajas esperadas de HLAARFA en términos de rentabilidad y reducción del tiempo de construcción, la investigación para comprender la naturaleza complicada de este nuevo material está creciendo cada vez más. Por lo tanto, el objetivo principal de este documento es revisar la metodología para desarrollar el diseño de mezclas de HLAARFA, así como el efecto del empleo de agregados livianos (AL) en las mismas. En resumen, las propiedades de HLAARFA y el diseño de la mezcla pueden mejorarse significativamente con la revisión de la literatura actualmente disponible.

## Desarrollo

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. El profesor Okamura presenta el método de diseño de mezcla más popular utilizado para el HAC. Su método lleva a cabo la prueba de pasta de cemento y mortero antes de pasar a evaluar las propiedades del superplastificante, cemento, agregado fino y adición mineral para salvar el proceso repetitivo de pruebas innecesarias (H. Okamura, 1999). En general, para la obtención del HLAARFA también 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 Hormigón Liviano Autocompactante (HLAC)*

En los trabajos revisados se han utilizado distintos tipos de AL, de origen natural e industrial. Piedra pómez, leca, arcilla expandida, pizarra expandida, cenizas volantes aglomeradas en frío, agregados artificiales y algunos

agregados provenientes de desechos industriales se encuentran entre la amplia gama de agregados livianos aplicados en los estudios. Siendo los más utilizados en hormigones estructurales la piedra pómez, el esquistos expandido y la arcilla expandida. Publicaciones recientes muestran que la utilización de estos AL en la elaboración de hormigones exhibe diferentes densidades, granulometrías, características de forma, densidad aparente y capacidad de absorción de agua que conducen a diferentes rendimientos de HLAARFA (Palacio, et al, 2020).

Aunque el diseño de mezclas de HLAC no sigue exactamente el diseño del HL y el HAC, aún se ve gobernado por las consideraciones tecnológicas y los problemas de la mezcla que estos poseen. La viscosidad del mortero y la fracción volumétrica de los áridos controlan el comportamiento de flujo. La mayoría de los estudios evalúan la fluidez de las mezclas frescas de HLAC mediante pruebas de asentamiento, pruebas de "J ring" y pruebas de "embudo en V" de acuerdo con el Comité de Concreto Autocompactante de EFNARC (Vakhshouri & Nejadi, 2016). El problema común reportado en casi todos los estudios publicados es asegurar la fluidez del estado fresco y la baja densidad del hormigón endurecido sin segregación. Debido a las cavidades cerradas de los AL, la absorción de agua es alta y es difícil estimar el volumen de agua requerido. La elevación del agua a la superficie durante la mezcla, en asociación con la tendencia de los agregados livianos a flotar, aumenta el riesgo de segregación (Liu, et al. 2011). A continuación se presentan algunos de los métodos de diseño de mezcla HLAC disponibles en la literatura.

Para desarrollar el diseño de HLAC, Shi et al. (2015) han combinado el volumen mínimo vacío para la mezcla de agregados, la teoría del exceso de pasta y las recomendaciones de ACI 211, (1992). 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 internas mínimas, así como para equilibrar la mezcla por la cantidad de agua retenida (ver Figura 1). 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.

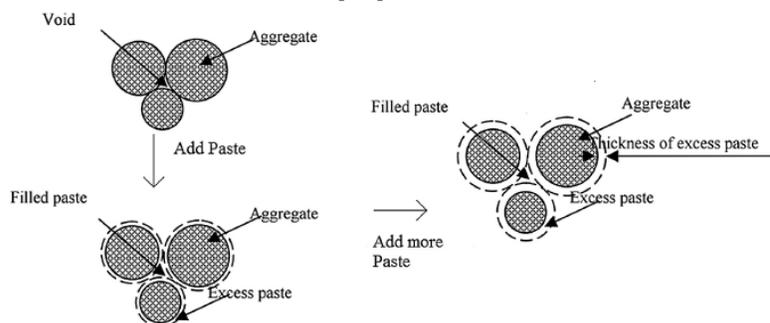


Figura 1. Teoría del exceso de pasta. (Abdizadeh, et al, 2009)

Kaffetzakis & Papanicolaou (2012) 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 de 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. Por otra parte, Nepomuceno et al. (2018) propuso una metodología que se basa en el estudio reológico de la fase 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 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.

#### *Dosificación del Hormigón Autocompactante Reforzado con Fibras de Acero (HACRFA)*

Barragán et al. (2003) aplicaron una metodología de diseño de HAC para la obtención de un HACRFA, evaluando

considera al hormigón como un material bifásico, la pasta y el esqueleto granular, cada uno de los cuales se optimiza 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 determina el menor contenido de vacíos y en base a esto el volumen de pasta necesario. Una vez conseguida la fluidez necesaria se agregan las distintas dosis de fibras de acero midiendo las propiedades en estado fresco y realizando los ajustes necesarios.

Pereira et al. (2004) llevaron a cabo método similar para definir la composición del HACRFA basado en tres pasos: i) lograr una composición óptima de la pasta, mediante la preparación de varias mezclas de filler, cemento y agua. Para favorecer la dispersión y desfloculación de las partículas finas en suspensión, también se añadió a cada mezcla una pequeña cantidad constante de superplastificante (SP). Se midieron la dispersión relativa en el Mini slump y el tiempo de flujo del Cono Marsh y para optimizar el contenido de SP, se mezclaron varias pastas con distintos dosis, manteniendo constantes todos los demás componentes ya optimizados. ii) En el segundo paso, se obtuvieron las proporciones más adecuadas de los agregados asumiendo como mezcla óptima de áridos la de máxima densidad e inicialmente se incluyó en cada mezcla una porción estimada de fibras equivalente a 30 kg de fibras por m<sup>3</sup> de hormigón. iii) En el tercer paso, se prepararon varias mezclas, con diferentes porcentajes de pasta para obtener el contenido óptimo. Para cada mezcla, el proceso de mezcla se mantuvo constante y el contenido de agua se ajustó en función del grado de saturación de los agregados. Se midieron la dispersión total y el tiempo para alcanzar un diámetro de extensión de 500 mm, T<sub>50</sub>.

Voigt et al. (2004) propusieron una fórmula para calcular el espesor promedio de la capa de pasta que envuelve las fibras y las partículas de agregado sobre la base del concepto multifacético. El volumen de huecos se determina utilizando la densidad de empaquetamiento de la fase formada por la mezcla de agregados y fibras, mediante la ASTM 29/C 29M-97 (1999). 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.

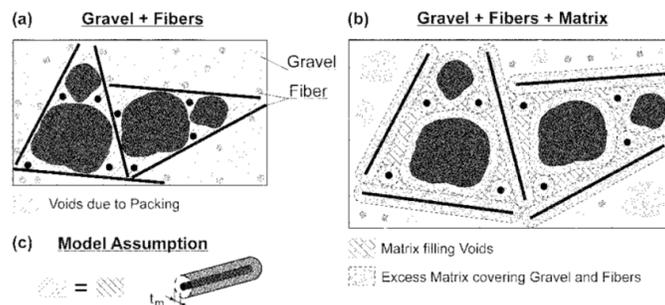


Figura 2: Explicación esquemática del concepto multifacético: (a) contenido vacío como resultado del empaquetamiento máximo de agregados y fibras; (b) distinción entre fibras, envolventes de pasta y huecos de agregados rellenos por pasta; y (c) asunción del modelo y grosor de la capa de matriz que cubre fibras y agregados. (Khayat & Abdelrazik, 2017)

Khayat et al. (2014) propusieron otro método considerando el concepto multifacético propuesto por Voigt et al. (2004) 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. Concluyeron 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 ajustando el contenido de arena para mantener una fluidez similar en el HACRF, así como otros ajustes necesarios en términos de dosis.

Saak et al. (2001) 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. 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. (2007) extendieron la reología del modelo de pasta a hormigones reforzados con fibras donde el diámetro promedio de las partículas de esqueleto sólido incluye los agregados gruesos, los agregados finos y las fibras. Para el cálculo se desarrollaron ecuaciones donde se consideran el tipo y dimensiones de las fibras a emplear.

## *Dosificación del HLAARFA*

En lo que respecta al HLAARFA, entre los trabajos con este objetivo se pueden mencionar el de Klein et al. (2011) presentaron diferentes composiciones de HLACRF empleando fibras de poliéster y de acero y obtuvieron un HLACRF óptimo con una densidad de 1665 kg/m<sup>3</sup>, 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. (2015) 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. Lograron desarrollar un HLAARFA con un flujo de asentamiento de más de 600 mm, una densidad de alrededor de 1700 kg/m<sup>3</sup> y una alta resistencia a la compresión en el rango de 60 MPa. Grabois et al. (2016) realizaron la caracterización experimental integral sobre cuatro mezclas de HLAARFA y 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. Se han utilizado diversas fibras metálicas en la producción de HLAARFA, pero pueden reducir la capacidad de fluidez y capacidad de paso. Por lo tanto, se requieren varios ensayos para establecer el tipo, la longitud y la cantidad óptimos para otorgar todas las propiedades requeridas.

Se observa que en la obtención de la dosificación para la elaboración de los hormigones 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.

## Resultados

La mayoría de las metodologías propuestas 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, y la relación óptima de agregados gruesos y finos que produzca la menor densidad de HLAC. Se observa que la relación entre agregados gruesos y finos utilizada generalmente está en el rango de 0,5 a 0,6 y la mayoría de los investigadores recomiendan la proporción de 0,6, ya que es la más favorable. De igual manera, se observa que para el diseño del HACRFA, 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.

En base a los trabajos observados, la mayoría de las especificaciones de mezclas de HLAC, HACRFA y principalmente HLAARFA consisten en procesos empíricos, basados en prueba y error, y adecuados a un campo específico de investigación, ya que la mayoría de los métodos propuestos no son adecuados una vez que se cambia el requisito de aplicación. Esto se hace comúnmente variando el contenido de aglomerante, la relación material cementicio/agua, la dosis de aditivos y la relación de agregado fino y grueso. Por ello se requiere un trabajo intensivo de laboratorio para obtener la información necesaria y la mayoría de las metodologías propuestas no pueden proporcionar el diseño de las mezclas en función del rendimiento requerido, como los criterios de trabajabilidad especificados y los criterios de resistencia a la compresión.

Esta revisión mejora la comprensión de la metodología de diseño de mezclas con el método de empaquetado agregado y fibras, que establece la relación entre el volumen de sólidos y el volumen de pasta, y que se presenta como un método de posible aplicación para el diseño de HLAARFA. En busca de lograr una valuación sistemática de los experimentos realizados por investigadores en diferentes partes del mundo y dado que HLAARFA es un tema novedoso en la industria de la construcción, la recopilación completa de datos hasta la fecha, acompañada de comparaciones analíticas será un punto de partida clave para las próximas investigaciones y la aplicación de HLAARFA en proyectos reales. Además se desarrollará la idea de que se puede esperar obtener HLAARFA adecuados para los posibles usuarios e investigadores y, también brindar a las personas interesadas e involucradas un contexto en el que evaluar sus propias prácticas.

## Referencias

- ACI Committee report 213R-03 structural lightweight aggregate concrete, American concrete institute, 2003.
- A.C., Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI.2-91), 1992.
- ASTM 29/C 29M-97 Standard (1999) "Test method for unit weight and voids in aggregate". Annual Book. Section 4: Construction; vol. 04.02: Concrete and Aggregates. pp 1-4.
- A.W. Saak, H.M. Jennings, S.P. Shah, (2001) "New methodology for designing self-compacting concrete", ACI Materials Journal 98 (6) 429-439.
- Barragán, B., Giaccio, G., Soriano, M. y Zerbino, R. (2003) "Desarrollo y caracterización de hormigones autocompactables reforzados con fibras de acero", CD 15 Reunión Técnica AATH, Trabajo T-53.
- C. Shi, Z. Wu, K. Lv, L. Wu, (2015) "A review on mixture design methods for selfcompacting concrete", Constr. Build. Mater. 84 387-398.
- Ferrara, Liberato, Yon-Dong Park, Surendra P. Shah, (2007) "A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete", Cement and Concrete Research 37, 957-971.
- Grabois, Thiago M., Chagas Cordeiro, G., Dias Toledo Filho, R. (2016) "Fresh and hardened-state properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers". Construction and Building Materials 104. 284-292.
- Holschemacher, K., Müller, T., Kieslich, H. (2014) "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, 45-51.
- H. Okamura, (1999) Self-compacting High Performance Concrete, Social System Institute, Tokyo.
- Iqbal, S., Ali, A., Holschemacher, K., & Bier, T. A. (2015) "Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self-compacting concrete (SHLSCC)". Construction and Building Materials, 98. 325-333.
- Kamal H. Khayat, Fodhil Kassimi, and Parviz Ghoddousi (2014) "Mixture Design and Testing of Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete" ACI Materials Journal, Title No. 111-M13 143-151.
- Khayat, K.H., Abdelrazik, A. (2017) "Performance of Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete for Repair of Bridge Sub-Structures and Fiber-Reinforced Super-Workable Concrete for Infrastructure Construction". Final Report Prepared for Missouri Department of Transportation. Report cmr17-012.
- M.C. Nepomuceno, L. Pereira-de-Oliveira, S.F. Pereira, (2018) "Mix design of structural lightweight self-compacting concrete incorporating coarse lightweight expanded clay aggregates", Constr. Build. Mater. 166, 373-385.
- M.I. Kaffetzakis, C.G. Papanicolaou, (2012) "Mix Proportioning method for lightweight aggregate SCC (LWASCC) based on the optimum packing point concept", in: Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction, Springer, pp. 131-151.
- N. Abdizadeh, A. Zekavati, H. Afshin, (2009) "Mix Design of Structural Self-compacting Concrete Using Void-Bulk Density Method".
- N.S. Klein, A. de la Fuente, A. Aguado, D. Maso, (2011) "Lightweight self-compacting concrete reinforced with fibres for slab rehabilitation". Mater. Construcc. 61 239-256.
- Palacio, A.J., Raggiotti, B.B., Rougier, V.C. (2020) "Hormigón liviano autocompactado de alta resistencia reforzado con fibras de acero. Análisis del avance en el desarrollo del diseño de mezclas." 23ª Reunión Técnica AATH, La Plata.
- Pereira E.B., Barros J.A.O., Ribeiro A., Cunha V.M.C.F., and Antunes J.A.B. (2004). "Self compacting steel fibre reinforced concrete for precast sandwich panels - experimental and numerical research." In Proceedings BeFib 2004, pages 15-17. Ancona, Italy.
- Thomas Voigt, Van K. Bui, and Surendra P. Shah, (2004) "Drying Shrinkage of Concrete Reinforced with Fibers and Welded-Wire Fabric". ACI Materials Journal, Title no. 101-M26, 233-241.
- Vakhshouri, B., Nejadi, S., (2016) "Mix design of light-weight self-compacting concrete." Case Studies in Construction Materials 4. 1-14.
- X. Liu, K.S. Chia, M.-H. Zhang, (2011) "Water absorption, permeability, and resistance to chloride-ion penetration of lightweight aggregate concrete", Constr. Build. Mater. 25 (1) 335-343.