

Estudio del método de diseño de mezclas de hormigón liviano autocompactado de alta resistencia reforzado con fibras de acero. Ensayos sobre pastas y morteros

Study on mixture design method of self-compacted, high-strength lightweight concrete reinforced with steel fibers. Study on pastes and mortars

Presentación: 4 y 5 de Octubre de 2022

Doctorando:

Alberto José Palacio

Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad (CINTEMAC), Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional – Argentina.

Grupo de Investigación de Ingeniería Civil Materiales y Ambiente (GIICMA), Facultad Regional Concordia, Universidad Tecnológica Nacional – Argentina.

apalacio@frcon.utn.edu.ar

Directora:

Bárbara Belén Raggiotti.

Codirectora:

Viviana Rougier.

Resumen

Se presentan los resultados de ensayos desarrollados en pastas y morteros, para analizar la influencia de los parámetros más importantes en la mezcla de hormigón alivianado autocompactante de alta resistencia reforzado con fibras de acero (HLAARFA). Se desarrollaron pastones para determinar la influencia del tipo de cemento sobre la fluidez de mezclas con aditivos superfluidificantes, en busca de diseñar un método de dosificación para HLAARFA en nuestro país. Se utilizó un cemento portland normal (CPN), un cemento compuesto (CPC), un cemento con filler (CPF) y una ceniza volante tipo F (CV). El estudio incluyó el tiempo de flujo de pastas en el cono de Marsh, medición del diámetro de flujo de asentamiento sobre pastas y morteros, y determinación del tiempo de flujo del embudo en V para morteros. Los ensayos se desarrollaron para mezclas con una relación agua-aglomerante de 0,33, aditivos reductores de agua de alto rango de 0,4–1,4 % (por contenido total de cemento). Se combinaron metodologías de diversos investigadores y su rendimiento se valida a través de resultados en pruebas de laboratorio. Los métodos pueden identificar los parámetros influyentes en el diseño de la mezcla y sus interacciones, lo que es de gran utilidad para elaborar el protocolo de prueba necesario para la dosificación de HLAARFA.

Palabras clave: Hormigón liviano autocompactante, reología, morteros, agregados livianos, dosificación.

Abstract

The results of tests carried out on pastes and mortars are presented to analyze the influence of the most important parameters in the Steel Fiber Reinforced High Strength Self Compacting Lightweight Concrete Mix (HLAARFA) design. Mixtures were developed to determine the influence of the type of cement on the fluidity of mixtures with superfluidifying additives, in order to develop an appropriate method to design HLAARFA in our country. They include an ordinary portland cement (CPN), a composite cement (CPC), a cement with calcareous filler (CPF) and fly ash as supplementary cementitious material. Such answers include flow time of pastes in the Marsh cone, measurement of settling flow diameter on pastes and mortars, and determination of V-funnel flow time for mortars. The tests were

developed for mixtures with a water-cement ratio of 0.33, superplasticizer dosages of 0.4–1.4% (by total cement content). Methodologies from various researchers were combined and their performance is validated through results in laboratory tests. The methods can identify the parameters influencing the mix design and their interactions, which is very useful to develop the necessary test protocol for HLAARFA design.

Keywords: Lightweight self-compacting concrete, rheology, mortars, lightweight aggregates, mix design.

Introducción

El hormigón liviano autocompactante (HLAC) es un tipo de hormigón de alta performance que combina las características de desempeño del hormigón autocompactante (HAC) y el hormigón de agregado liviano (HL). Por otro lado, la adición de fibra como forma efectiva de resolver la fragilidad y mejorar la resistencia al agrietamiento, ha sido confirmado por muchos investigadores (Rodríguez Lozano et al., 2013; Olivito & Zuccarello 2010). Por lo tanto, la combinación de la tecnología del HLAC y del HACRF para preparar hormigón liviano de alta resistencia autocompactado y reforzado con fibras de acero (HLAARFA) es muy atractiva ya que la fibra puede restringir la flotabilidad o el hundimiento del agregado y reducir la segregación y el riesgo de exudación en la mezcla (Klein et al., 2011). Es así que el HLAARFA tiene una amplia perspectiva de empleo, especialmente como refuerzo de elementos de hormigón armado, a los efectos de mejorar su resistencia a flexión (Holschemacher et al., 2014).

Debido a la composición compleja de los constituyentes del HLAARFA, la propiedad de baja densidad acompañada de la autocompactación, y la contradicción entre cohesión y fluidez, es difícil diseñar este tipo de hormigones. El HLAARFA es un nuevo tipo de hormigón de alto rendimiento desarrollado sobre la base del HLAC y del HACRF, por lo tanto, el método de diseño de mezclas de éstos puede usarse como referencia para el diseño de mezclas de HLAARFA (Palacio et al., 2020). El HLAC incluye principalmente el método de diseño empírico (método de punto óptimo de empaquetamiento, volumen mínimo de vacíos y criterios de trabajabilidad), el método basado en la teoría del exceso de pasta, el basado en el modelo factorial estadístico, y el método basado en el modelo reológico de la pasta (Ting et al., 2019). En cuanto a los métodos de diseño de mezclas de HACRF, incluyen principalmente el basado en el espesor de la pasta y la teoría del relleno (Khayat et al., 2014), el método basado en las características reológicas de la pasta (Ferrera et al., 2007) y el método basado en la composición óptima de pasta (Pereira et al., 2004). Muchos criterios de dosificación se han planteado, sin embargo, a conocimiento del autor, no existe un método de diseño de mezcla especial ni una especificación técnica para HLAARFA en la actualidad.

El presente trabajo forma parte de un estudio más amplio que busca proponer un método de diseño de mezclas de HLAARFA con aplicabilidad amplia empleando los equipos y materiales disponibles en la región. Se recogen los resultados de una serie de ensayos realizados hasta el momento, en primer lugar, sobre pastas, elaboradas con diferentes tipos de cementos locales y distintos aditivos superfluidificantes, mediante la aplicación del cono de Marsh. La segunda serie de ensayos de extendido empleando un molde troncocónico y el embudo en V, para valorar la fluidez y viscosidad de los morteros. El estudio busca determinar, de forma cuantificable, el contenido de aditivo para cada tipo de cemento, como también evaluar en forma comparativa la variación de la fluidez en el tiempo para diferentes combinaciones de material cementicio y aditivo, con el fin de optimizar las mezclas para la obtención de un HLAARFA.

Desarrollo

Metodología: Ensayos sobre pastas

En la Universidad Politécnica de Cataluña, Gomes et al. (2002) han utilizado los ensayos de Cono de Marsh y mini-slump para definir la composición óptima de la pasta utilizada para fabricar un hormigón autocompactante de alta resistencia, así como también para determinar la compatibilidad entre cementos y aditivos. Mediante el cono de Marsh con apertura de salida de 8 mm (Figura 1.a) se analiza la fluidez de las pastas. En este caso el procedimiento consistió en introducir 800 ml de pasta en el cono y medir el tiempo (T) que tarda en fluir una cantidad de 200 ml de la misma. Para obtener cada valor de T se realizaron tres mediciones y se informa el promedio del tiempo de paso. Para la elaboración de las pastas se utilizó una mezcladora Alein con dos velocidades de mezclado, 125 rpm (alta) y 62 rpm (baja). Se evaluó la fluidez luego de transcurridos 10 minutos y 60 minutos del contacto entre el agua y los materiales para detectar casos de incompatibilidad entre ligantes y aditivos.

Posteriormente, basándose en el procedimiento de diseño para HAC definido por la EFNARC (2005), se realizó la determinación de la relación agua-material cementicio (a/mc), con el fin de obtener la demanda de agua del cemento

o su mezcla con adiciones. Para hallarlo, se realizaron sucesivos ensayos de flujo de asentamiento empleando un molde troncocónico de 60 mm de altura, con diámetros superior e inferior iguales a 70 mm y 100 mm respectivamente (Figura 1). Se emplean relaciones V_a/V_{mc} arbitrarias que luego se grafican vs diámetro de flujo relativo (Γ_m), el cual se calcula como $\Gamma_m = d_m/d_o - 1$. Donde d_m es el promedio de dos diámetros perpendiculares obtenidos del ensayo, y d_o es el diámetro de la base del cono, igual a 100 mm. El β_p es la ordenada al origen del gráfico obtenido realizando una regresión sobre los resultados. Con el valor de β_p , se puede calcular la relación V_a/V_{mc} como 0,8-0,9 de β_p y luego, la relación a/mc en masa.

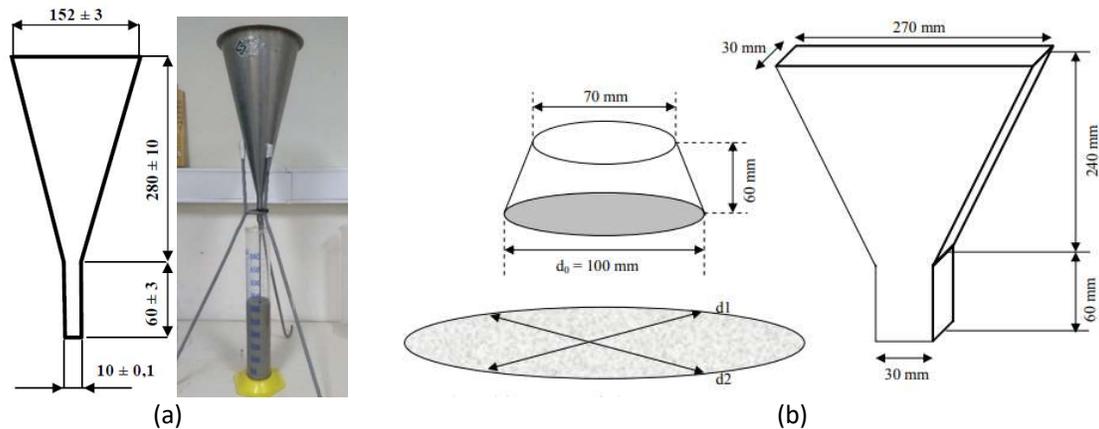


Figura 1: (a) Dimensiones y ensayo cono de Marsh (b) Ensayo de flujo de mortero y dimensiones de cono en V.

Ensayos sobre morteros

Para evaluar las características del mortero, Okamura (2000) propuso la utilización de dos ensayos. El primero es el ensayo de flujo (utilizando el mini cono descrito previamente). El resultado se expresa por medio del parámetro G_m , que se calcula como $G_m = (d_1 \cdot d_2 - d_o^2)/d_o^2$. Para determinarlo se ubica el cono sobre una superficie lisa y nivelada, se llena con el mortero, se enrasa y se levanta suavemente. Finalmente se mide dos diámetros perpendiculares, d_1 y d_2 , de la huella de mortero siendo d_o es el diámetro inferior del cono. El segundo ensayo, denominado Embudo en V o "V-Funnel" para morteros (Figura 1.b). Del mismo se obtiene el tiempo T (en segundos) que tarda la muestra en fluir a través del embudo. El resultado se expresa por medio del parámetro $R_m = 10/T$. Altos valores de G_m indican una gran capacidad de deformación y bajos valores de R_m indican una alta viscosidad de la mezcla (Rigueira Victor, JW. 2008). Algunos autores determinaron que estos ensayos tienen buena correlación con los dos parámetros reológicos, de tensión de corte umbral (τ_o) y viscosidad plástica (μ) (Mahdikhani, 2015). En base al criterio definido por Okamura y EFNARC se establece que un valor adecuado en estos ensayos son un tiempo de flujo entre 7 y 11 segundos y diámetros de escurrimiento de 250 mm. En este caso, manteniendo constante la relación a/mc, se utilizó una relación volumétrica del agregado fino respecto del mortero de 0,40, entendiéndose como relación volumétrica al cociente entre el volumen de arena y el volumen de mortero excluyendo el aire. Esto es debido a que relaciones mayores a 0,50 traen aparejados riesgos de bloqueo y excesiva viscosidad plástica (Fava, 2003).

Materiales y mezclas

En este estudio se utilizaron tres tipos de cementos de uso general en la región, un cemento portland compuesto (CPC40, IRAM 50000), un cemento portland con "filler" calacáreo (CPF40, IRAM 50000) y un cemento portland normal (CPN40, IRAM 50000). Sobre los cuales se realizaron los ensayos de caracterización establecidos por Norma IRAM 50000/1, presentados en la Tabla 1. Como material cementicio suplementario se empleó una ceniza volante tipo F, con una finura Blaine de $241 \text{ m}^2/\text{kg}$, una densidad de $2,15 \text{ gr}/\text{cm}^3$ y un índice de actividad puzolánica con cemento normal de 110 % a 28 días, según Norma IRAM 1654-1. El contenido en peso de ceniza volante incorporado en los ensayos fue de 20 %. Este contenido se adoptó debido a que, diversas publicaciones realizadas sobre morteros y hormigones especiales, mostraron que contenidos de 20-25 % de esta adición producen buenos niveles resistentes en las mezclas obtenidas (Mamirov, 2019).

Los aditivos empleados fueron reductores de agua de alto rango (RAAR), también conocidos como aditivos de 3ª generación, de dos marcas diferentes con bases químicas de policarboxilatos y polímeros sintéticos modificados. Estos fueron identificados con las letras A y B según su marca y con un número correlativo y sus dosis son expresadas siempre como contenido líquido referido al peso de cemento.

Designación IRAM 50000/1	F. Blaine [m ² /kg]	T. de Fraguado [min]		Resist. a comp. [MPa]		Densidad [gr/cm ³]	Agua C. Normal [gr]
		Inicial	Final	2 días	28 días		
CPN40	3667	268	303	20,56	40,24	2,99	143
CPC40	4165	210	240	19,66	47,45	3,08	139
CPF40	4293	200	222	13,69	35,03	2,98	138

Tabla 1: Características de los cementos empleados.

Resultados

Relación mínima V_a/V_{mc} para flujo cero

Se determinó el parámetro β_P , el cual indica la mínima relación a/mc en volumen necesaria para que la pasta comience afluir. En la Tabla 2 se presentan los ensayos para pastas elaboradas con cemento y pastas con un 20% de reemplazo en masa por ceniza volante. Estos resultados demostraron una menor demanda de agua por parte de la pasta con reemplazo de ceniza debido a la forma esférica de sus partículas, coincidente con los informado en la literatura (López & Castro, 2010). Esto es importante ya que se puede lograr igual trabajabilidad con menores relaciones a/mc o un menor contenido de aditivo reductor de agua (Dubey & Kumar, 2013).

Cemento	%CV	β_P	V_a/V_{mc} inf.	V_a/V_{mc} sup.	m_a/m_{mc} inf.	m_a/m_{mc} sup.
CPC	0	1,2	0,96	1,08	0,31	0,35
CPF	0	1,17	0,94	1,05	0,32	0,35
CPN	0	1,16	0,93	1,04	0,31	0,35
CPC	20	1,17	0,94	1,05	0,32	0,36
CPF	20	1,13	0,91	1,02	0,32	0,36
CPN	20	1,08	0,87	0,97	0,31	0,34

Tabla 2: Rangos de relación a/mc obtenidos

Al multiplicar β_P por los extremos del rango 0.8-0.9 sugeridos por la EFNARC se obtuvo los valores de relación a/mc detallados en la Tabla 3. El valor de a/mc de 0,33 empleado se encuentra entre los valores límites para todas las pastas, con lo cual se corrobora la correcta elección de este valor.

Compatibilidad cemento-aditivo superfluidificante

Se analizó el tiempo de escurrimiento y la pérdida de fluidez en el tiempo para una relación agua-cemento (a/c) predeterminada de 0,33 en peso. En la Figura 2 puede observarse las gráficas que permiten obtener el valor de la dosis de saturación y la compatibilidad de los cementos con cada aditivo. Se observa que, para una dosificación que excede el punto de saturación, la curva de flujo es relativamente plana ya que no hay una disminución notable en el tiempo de flujo. De todos los gráficos, el CPC40 mostró un tiempo de flujo más bajo en esta relación a/c para la mayoría de los aditivos. La fluidez mejora con el aumento de la dosis de superplastificante, debido a la mayor capacidad de dispersión (Ajay et al. 2020). Sin embargo, a medida que se aumentaba su dosis más allá del punto de saturación, las posibilidades de segregación eran predominantes y también la pasta presentaba mayor comportamiento tixotrópico. El CPC y CPF, que tenían mayor finura, mostraron una menor fluidez y dosis de saturación más altas en comparación con el sistema CPN. La mayor compatibilidad se manifiesta con los aditivos SP-A2 y SP-A3, donde las curvas de 10 minutos de asemejan mucho a las de 60 minutos y el punto de saturación queda claramente definido. Cabe mencionar que al emplear los aditivos SP-B1 y SP-B2 se presentaba muy baja fluidez, siendo imposible su determinación a los 60 minutos posteriores al mezclado. Esto muestra indicios de incompatibilidad con estos cementos para la relación a/c empleada.

Resultados de los morteros estudiados

Hasta el momento se realizaron 13 mezclas de mortero elaboradas con el aditivo SP-A3 y los cementos CPC40 y el CPF40. En estas mezclas se buscó ajustar la dosis de aditivo, la relación a/mc, el contenido de ceniza volante y la proporción de AF/AG para obtener los valores recomendados. Empleando como punto de partida la relación a/mc de 0,33, 20% de CV y 40% de agregado fino, el cumplimiento del diámetro de extendido se logró para una dosis de aditivo del orden de 0,40, pero no fue posible lograr el tiempo de vaciado recomendado. Para aumentar el tiempo en el embudo en V, se incrementó levemente el contenido de arena a 45% y el de ceniza volante al 25%, en base a lo informado en literatura (Hu & Wang, 2011; Khaleel & Razak, 2013).

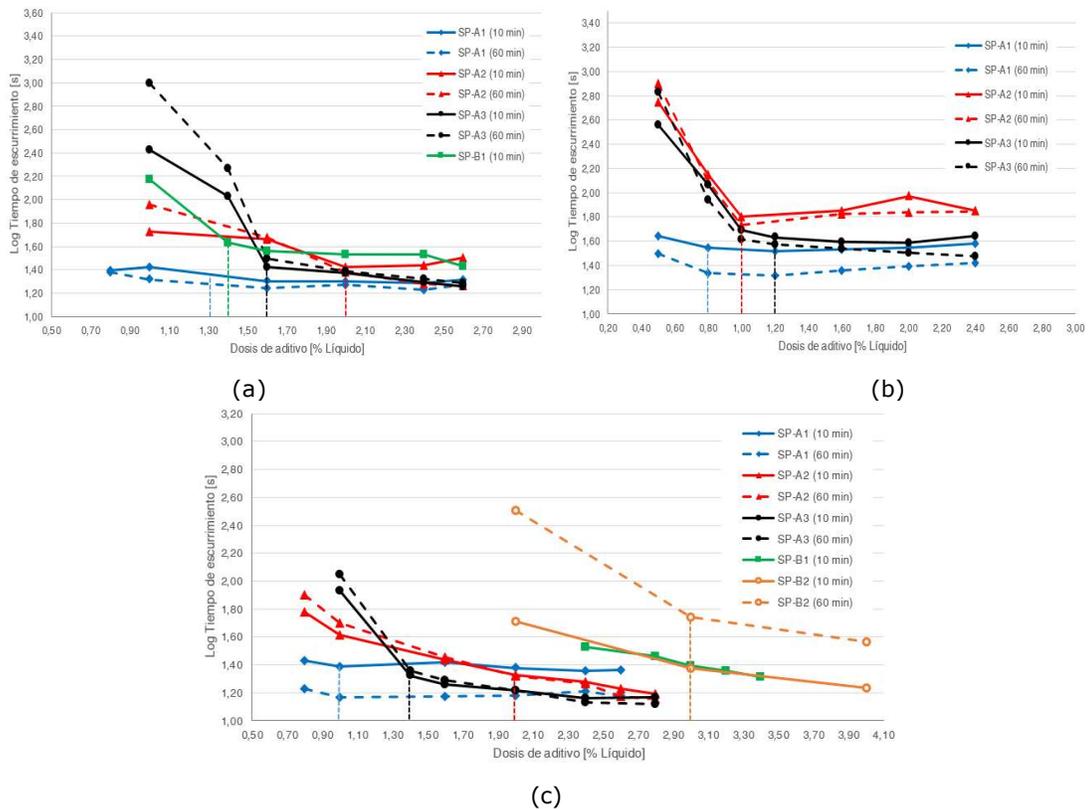


Figura 2: Curvas de flujo obtenidas en pastas empleando los aditivos en estudio para una relación a/c de 0,33
(a) CPF40 (b) CPN40 (c) CPC40.

Se observa que, como es lógico a medida que aumenta la dosis de aditivo se produce un aumento de R_m y G_m así como también al aumentar la relación a/mc y, en menor medida, al incrementar el porcentaje de CV. Por otro lado, el aumento de agregado finos en la mezcla reduce el valor de G_m , esto podría deberse a que, la capa de pasta alrededor de las partículas de arena se reduce y, por lo tanto, aumenta la fricción entre las partículas. De los resultados obtenidos, surge que las mezclas que se acercaron mejor a los parámetros buscados son las M-4, M-9 y M-10. Sin embargo, es necesario continuar las evaluaciones para mejorar el ajuste a las pautas de diseño sobre todos los cementos, mediante el empleo de otro aditivo, la variación del contenido de ceniza volante o la incorporación de un filler calcáreo.

Conclusiones

En el presente trabajo se presentaron las experiencias realizadas hasta el momento, vinculadas con el estudio sobre pastas y morteros para determinación de la influencia del tipo de cemento sobre la fluidez de mezclas con aditivos superfluidificantes, en busca de desarrollar un método de dosificación para HLAARFA. Se incluyeron un cemento CPN, CPC, CPF y una ceniza volante tipo F. Las principales conclusiones se indican a continuación:

Los cementos con adiciones presentan una menor dosis de saturación, pero presentan una menor fluidez que la obtenida con el cemento CPN, poniendo de manifiesto la mayor cohesión de las pastas, lo que también se apreció visualmente. La mayor cohesión puede deberse a una mejor distribución y empaquetamiento de las partículas de cemento y adición. Además, para cada tipo de cemento las dosis de saturación determinadas en pastas presentaron una ligera tendencia a crecer en los morteros. Además, como resultado del agregado de ceniza en sustitución por el cemento, se logró una reducción en el contenido de aditivo superfluidificante requerido.

La relación a/mc constituye una variable muy importante en el comportamiento de las mezclas, así como la superficie específica del cemento que afecta la capacidad de retención y fijación del aditivo, pero también existen otras variables como la composición mineralógica del cemento y la distribución granulométrica del agregado fino que modifican las propiedades reológicas de las mezclas. Debido a esto se debe continuar el estudio sobre morteros con el fin de poder evaluar los cambios producidos por la modificación de los materiales empleados.

Para el diseño de la familia de HAC resulta importante el estudio sobre pastas, principalmente para verificar la compatibilidad entre los cementos y con las adiciones y los aditivos a emplear. Esto permite definir en primera instancia las dosis de aditivos, el porcentaje de adiciones, la relación a/mc y granulometría de la arena, como un punto de partida para comenzar los ajustes en hormigones permitiendo un ahorro de tiempo y materiales en el proceso de dosificación.

Referencias

- Athira Ajay et al (2020) A study on compatibility of superplasticizers with high strength blended cement paste IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci. 491 012043. doi:10.1088/1755-1315/491/1/012043
- Dubey, R., & Kumar, P. (2013). Effect of Fly Ash on Water / Powder Ratio and Superplasticizer Dosage in Self-Compacting Mortars. *International Journal of Architecture, Engineering and Construction*, 2(1), 55–62.
- EFNARC (2005). *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use*. SCC 028.
- Fava, Carlos A.P. (2003) Hormigón autocompactante: Desarrollo y caracterización. Tesis magíster. UNCPBA. Facultad de ingeniería. <https://www.fio.unicen.edu.ar/images/stories/carreras/posgrado/hormigon/tesis/TesisFava.pdf>
- Ferrara, L., Park, Y.D., Shah, S.P. "A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 957–971.
- Gomes, P.C.C., Gettu, R., Agulló, L., Bernad, C. (2002). Mixture Proportioning of High Strength Self-Compacting Concrete. Using Simple Test Methods." 3^o Int. Conference on High Performance Concrete, and Quality of Concrete Structures. 1-4.
- 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.
- Hu, J., & Wang, K. (2011). Effect of coarse aggregate characteristics on concrete rheology. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1196–1204. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.035>
- Khaleel, O. R., & Razak, H. A. (2013). Mix Design Method for Self Compacting Metakaolin Concrete with Different Properties of Coarse Aggregate. *Journal of Materials & Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.072>.
- 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.
- Klein, N.S., De la Fuente, A., Aguado, A., Maso, D. (2011). Lightweight self-compacting concrete reinforced with fibres for slab rehabilitation. *Mater. Construcc.* 61 239–256.
- López, M., & Castro, J. T. (2010). Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros del hormigón con el tiempo. *Revista Ingeniería de Construcción*, 25(3), 13.
- Mahdikhani, M., & Ramezani pour, A. (2015). New methods development for evaluation rheological properties of self-consolidating mortars. *Construction and Building Materials*, 75, 136–143.
- Okamura, H., Ozawa, K., Ouchi, M. (2000) Self-Compacting Concrete. *Structural Concrete*, V.1, N^o1, [3 – 17].
- Olivito, R. S., Zuccarello, F. A. (2010). An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*, 41(3).246–255.
- 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 Téc. AATH, La Plata, Argentina.
- Pereira E.B., Barros J.A.O., Ribeiro A., Cunha V.M., Antunes J.A.B. (2004). Self-compacting steel fibre reinforced concrete for precasted sandwich panels - experimental and numerical research. *Proceedings BeFib 2004*, 15-17. Ancona, Italy
- Rigueira Victor, JW. (2008). Estudio de la sensibilidad e influencia de la composición en las propiedades reológicas y mecánicas de los hormigones autocompactantes [Tesis doctoral]. Universitat Politècnica de València.
- Rodríguez Lozano, J. J., Segura Vicent, E. (2013). Análisis comparativo del efecto de los distintos tipos de fibras en el comportamiento post fisura del hormigón reforzado con fibras. *Proy. final de grado. Univ. Politècnica de Valencia*. Valencia, España. 1–88.
- Ting, T.Z.H., Rahman, M.E., Lau, H.H., Ting, M.Z.Y. (2019). Recent development and perspective of lightweight aggregates based self-compacting concrete. *Construction and Building Materials* 201. 763–777.