

Hormigones Livianos Autocompactantes Reforzados con Fibra de Acero. Propuesta de un Método de Diseño y Ensayos de Caracterización.

Self-Compacting Lightweight Concretes Reinforced with Steel Fiber. Proposal of a Design Method and Characterization Tests.

Presentación: 06/10/2024

Doctorando:

Alberto José PALACIO

Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad (CINTEMAC), F.R. Córdoba de la UTN - Argentina.
Grupo de Investigación de Ingeniería Civil Materiales y Ambiente (GIICMA), F.R. Concordia de la UTN - Argentina.
apalacio@frcon.utn.edu.ar

Director/a:

Bárbara Belén RAGGIOTTI

Codirector/a: (si corresponde)

Viviana Carolina ROUGIER

Resumen

Se presenta la introducción a un procedimiento racional desarrollado para la dosificación de hormigones ligeros autocompactantes de alta resistencia reforzados con fibras de acero (HLAARFA). El método de diseño de mezclas se desarrolla basado en el concepto de empaquetamiento de partículas y el ajuste las propiedades reológicas de pastas y morteros mediante ensayos simples. Se recogen los resultados de una serie de ensayos realizados sobre los agregados para lograr el ajuste del esqueleto granular, pruebas sobre pastas y ensayos para valorar la fluidez y viscosidad de los morteros. Los criterios de diseño adoptados para el material están definidos por el cumplimiento de requisitos en estado fresco y endurecido. Para verificar la aplicabilidad del método, se diseñaron y prepararon seis mezclas de hormigones ligeros autocompactantes de alta resistencia (HLAC) y posteriormente, mediante un diseño basado en la aplicación de ensayos simples, obtener un HLAARFA. Finalmente se evalúa una dosificación de HLAARFA empleando las proporciones de materiales que cumplan con los requerimientos de autocompactabilidad en estado fresco y una resistencia elevada a compresión. Los resultados permitieron identificar los parámetros influyentes en el diseño de la mezcla para elaborar el protocolo de prueba necesario para la dosificación del HLAARFA.

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

Abstract

This paper presents an introduction to a rational procedure developed for the mix design of high-strength steel fiber reinforced self-compacting lightweight concrete (SHLSCC). The mixture design method is developed based on the concept of particle packing and the adjustment of the rheological properties of pastes and mortars by means of simple tests. The results of a series of tests carried out on aggregates to achieve the adjustment of the granular skeleton, tests on pastes and tests to assess the fluidity and viscosity of mortars are collected. The design criteria adopted for the material are defined by the fulfillment of self-compacting and compressive strength requirements. To verify the applicability of the method, six self-compacting lightweight concrete (SCLC) mixtures were designed and prepared to obtain a SHLSCC, by means of a design

based on the application of simple tests. Finally, a SHLSCC dosage is evaluated using the proportions of materials that meet the requirements of self-compactability in the fresh state and high compressive strength. The results allowed identifying the parameters that influence the mix design in order to develop the test protocol necessary for the dosage of HLAARFA.

Keywords: Self-compacting lightweight concrete, Steel fiber reinforced concrete, High-strength concrete, Lightweight aggregates, Mixture design method.

Introducción

El desarrollo del hormigón liviano autocompactante (HLAC) puede permitir unir las ventajas de los tipos de hormigón liviano (HL) y hormigón autocompactante (HAC). El HLAC tiene las ventajas de alta fluidez, compactación sin vibración, baja densidad, mayor aislación térmica, excelente comportamiento sísmico, etc. (Vakhshouri y Nejadi, 2016). Además, el uso de refuerzo de fibras mejora la respuesta mecánica del material bajo cargas directas de tracción y flexión, lo que aumenta la capacidad de deformación, la tenacidad y el comportamiento posterior a la fisuración (Khayat et al. 2014; Filho et al. 2016). Es así que, con la creciente demanda de versatilidad en el campo de la ingeniería civil, el Hormigón Liviano Autocompactante Reforzado con Fibras (HLACRF), tiene amplias perspectivas de empleo, particularmente en aplicaciones de rehabilitación.

Algunos autores se han centrado en los procedimientos de diseño de mezcla ya que resulta un factor determinante en la producción, trabajabilidad, propiedades mecánicas y la durabilidad de la mezcla en servicio (Shi et al. 2015). Debido a la composición compleja de las materias primas del HLAARFA, el requerimiento de baja densidad y autocompactación, y la contradicción entre cohesión y fluidez, es difícil preparar esta mezcla. Es por esto que el método de diseño de mezclas de HLAC y hormigón autocompactante reforzado con fibras (HACRF) se empleó como referencia para el diseño de mezclas HLAARFA. Entre ellos se pueden mencionar el de Klein et al. (2011) quienes presentaron composiciones de HLACRF empleando fibras de poliéster y de acero para rehabilitar y mejorar la rigidez de estructuras de edificios. Iqbal et al. (2015) investigaron el efecto del cambio en el contenido de fibras y micro fibra de acero en las propiedades de los HLAARFA. Grabois et al. (2016) realizaron la caracterización experimental sobre el estado fresco y endurecido de cuatro mezclas de HLAARFA. Por su parte Li et al. (2021) propusieron un método semi racional de diseño de mezcla de hormigón ligero autocompactante reforzado con macrofibra y microfibras de acero, basado en la teoría del espesor de la película de pasta y el método de combinación.

Del relevamiento bibliográfico se observó que para la obtención de la dosificación de los HLAARFA se realizan pruebas iterativas, donde se elaboran distintas mezclas desde pastas hasta hormigones. Debido a ello, es necesario proponer un método de diseño que no sólo pueda evitar de manera efectiva la determinación por tanteos del contenido de material cementicio, sino que también realice el cálculo cuantitativo del contenido de materia prima y aproveche al máximo el efecto de refuerzo de fibra. Es así que, en este trabajo se propone un método de dosificación racional para optimizar las mezclas de HLAC y lograr la obtención de un HLAARFA, mediante un diseño basado en el concepto de empaquetamiento de partículas y el ajuste las propiedades reológicas de pastas y morteros mediante ensayos simples.

Desarrollo

Metodología para el diseño de las mezclas

Combinando los métodos de dosificación para HAC de Gomes et al. (2002), EFNARC (2005) y Okamura (2000); y a partir de los métodos para el ajuste de composición de Li et al. (2017) para HLAC y el de Ferrara et al. (2007) para HACRFA, se propone un procedimiento de diseño cíclico de tres pasos como se muestra en la Figura 1. El procedimiento comienza por el ajuste del empaque de partículas mediante curvas de optimización y la minimización del volumen de vacíos, determinando la proporción de cada agregado. En el siguiente paso se determina la composición de la pasta y la verificación de las propiedades reológicas en morteros. Finalmente, en función de estas determinaciones se fabrican los hormigones livianos autocompactantes reforzados con fibras y se realizaron los ensayos necesarios para evaluar las características de fluidez, estabilidad, habilidad de paso entre armaduras y resistencia a la compresión en estado endurecido.

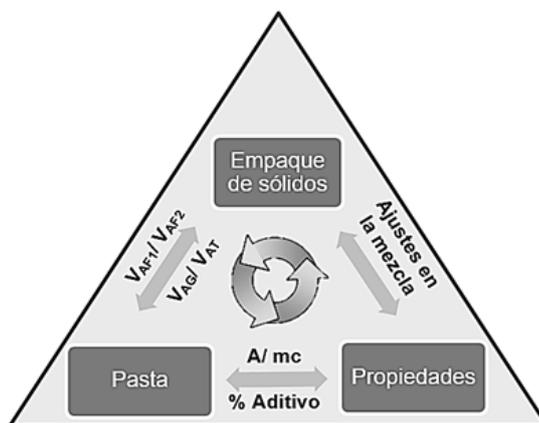


Figura 1: Procedimiento de diseño de HLAARF.

Para simplificar el cálculo, se proponen supuestos basados en algunos estudios relativos a la teoría del espesor de la película (Li et al. 2017; Shi et al. 2015 y Ferrera et al. 2007). En primer lugar, se supone que las partículas de agregado grueso son esféricas y su tamaño puede obtenerse mediante el análisis granulométrico. Luego las fibras son incluidas en la distribución granulométrica del esqueleto sólido mediante el concepto de diámetro equivalente, definido a partir de su superficie específica.

Material

Se empleó como agregado grueso liviano arcilla expandida (AE) clinquerizada. Como agregado fino (AF) se emplearon dos arenas silíceas naturales, una AF1 con un módulo de finura de 1,91 y pasa tamiz #50 de 29,9%; y una arena AF2 con un módulo de finura de 3,27 y pasa tamiz #50 de 7,3%. El porcentaje de vacíos es de 44,1% para la AF1 y 41,7% para la AF2. El peso específico de ambas arenas es de 2,60 g/cm³. En la Figura 2.a se muestran las distribuciones granulométricas.

Se utilizaron tres tipos de cementos, un cemento portland compuesto (CPC40), un cemento portland con filler calcáreo (CPF40) y un cemento portland normal (CPN40), presentados en la Tabla 1. Como material cementicio suplementario se empleó una ceniza volante (CV) tipo F, con una finura Blaine de 2410 cm²/g, una densidad de 2,15 g/cm³ y un índice de actividad puzolánica con cemento normal de 110 % a 28 días, según Norma IRAM 1654-1. Teniendo en cuenta trabajos similares en HAC, se adoptó un contenido de 20 % en peso (Mamirov, 2019).

Los aditivos empleados fueron reductores de agua de alto rango (RAAR) con bases químicas de policarboxilatos y polímeros sintéticos modificados, identificados con las letras A y B según su marca comercial. Sus dosis son expresadas siempre como contenido líquido referido al peso de cemento. En la Tabla 2 se presentan las características de los aditivos utilizados a lo largo de este trabajo. Para la elaboración de los hormigones también se emplearon fibras de acero (FA) en forma de gancho Wirand FS3N, con una longitud de 33 mm y un diámetro de 0,75 mm.

Designación IRAM 50000/1	Finura Blaine [cm ² /g]	Tiempo de Fraguado [min]		Resistencia a compresión [MPa]		Densidad [g/cm ³]	Agua C. Normal [g]
		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.

Designación	Base química	Den. [g/cm ³]	Red. de agua [%]	Dosis [%CUC]
SP-A1	Polímeros sintéticos modificados	1,10	10-35	0,40-1,00
SP-A2	Policarboxilato	1,20	5-20	0,40-1,00
SP-A3	Naftaleno modificado	1,18-1,21	10-35	0,39-1,44
SP-B1	Polímeros sintéticos modificados	1,18	6-20	0,50-1,40
SP-B2	Policarboxilato	1,15	10-35	0,60-1,35

Tabla 2: Características de los aditivos empleados.

Resultados

1- Optimización del esqueleto granular- Relación de volumen entre AG y AF y contenido de fibras.

Se llevó a cabo la optimización por medio de mezclas en seco de acuerdo con el método propuesto por Gomes (2002) basado en la norma ASTM C29/CM29, en nuestro caso la IRAM 1548. Se estableció la relación entre la densidad aparente compactada o porcentaje de vacíos (Ev) de los agregados binarios finos y gruesos con diferente relación, como se muestra en la Figura 2.b y Figura 2.c respectivamente.

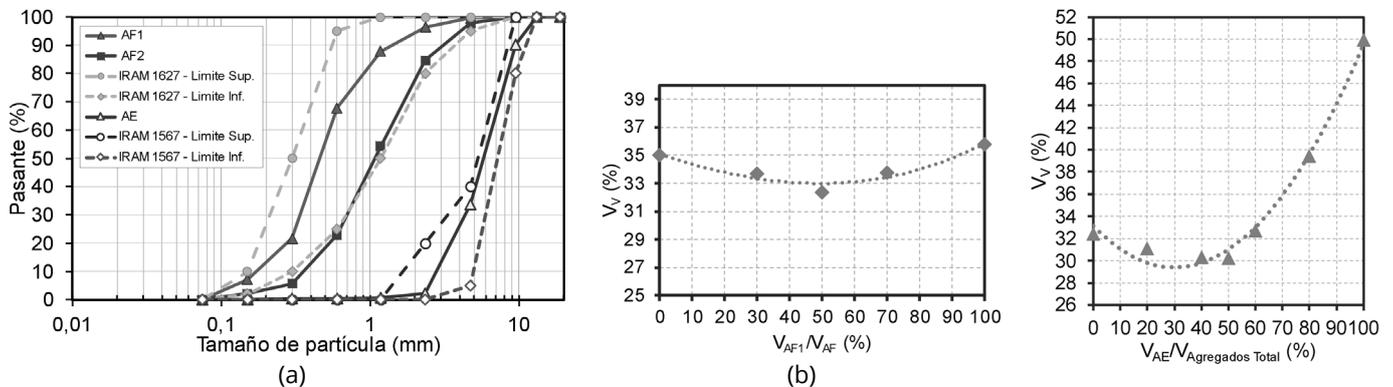


Figura 2: (a) Granulometrías de agregados finos (AF1 y AF2) y el agregado grueso (AE), (b) Variación del porcentaje de vacíos en la mezcla de agregados finos (b) Variación del porcentaje de vacíos en la mezcla de AE y AF con $V_{AF1}/V_{AF2} = 30/70$.

En la Figura 2.b se puede detectar que el porcentaje de vacíos más bajo de la mezcla de agregados finos fue alrededor del 32 % para una relación de volumen de 50/50. Teniendo en cuenta que para las arenas las proporciones en peso y volumen se conservan, se adoptó una relación 30/70 de V_{AF1}/V_{AF2} y con esta se obtuvo la curva de agregados binarios gruesos y finos (Figura 2.c).

2- Determinación de la relación a/mc y dosis de aditivo y cálculo de la cantidad de los materiales cementicios.

EFNARC 2005 propone ensayos de extendido sobre pastas variando la relación a/mc. Empleando pastas elaboradas con cemento y con un 20 % de reemplazo en masa por ceniza volante se determinó 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 y Castro, 2010). Se observó que el valor de a/mc de 0,33 se encontraba entre los valores límites para todas las pastas, con lo cual se adoptó este valor como punto de partida para el diseño de las mezclas.

Mediante el ensayo del cono de Marsh con apertura de salida de 8 mm, se evaluó la fluidez luego de transcurridos 10 minutos y 60 minutos del contacto entre el agua y los materiales con el fin de detectar casos de incompatibilidad entre ligantes y aditivos. Se observa en la Figura 3.a gráficas de flujo de los tres cementos con un aditivo superplastificante modificador de reología (SP-A3), con el cual el CPC40 mostró mayor compatibilidad ya que las curvas de 10 y 60 minutos de asemejan mucho y el punto de saturación queda claramente definido.

Posteriormente, se realizaron mezclas de mortero con estos materiales empleando el ensayo de extensión de flujo y el embudo en V para morteros, los cuales indican la capacidad de deformación y la viscosidad de la mezcla. En estas mezclas se buscó ajustar la dosis de aditivo, la relación a/mc, el contenido de CV y la razón A_{F1}/A_{F2} . En las Figura 3.b y 3.c se muestran los resultados obtenidos en 5 de un total de 13 mezclas de mortero, en este caso designadas como MC en función del tipo de cemento empleado (CPC), seguidas de números indicativos de la relación a/mc y el porcentaje de CV empleado. Se definió una dosis de aditivo SP-A3 de 1,30 para una relación a/mc de 0,32 y la combinación del CPC40 con un 20 % de CV.

3- Ajuste en pastones de prueba.

Posteriormente se fabricaron y evaluaron HLAC con distintos contenidos de pasta, en el rango de 35-42 % en volumen de acuerdo a lo recomendado por EFNARC (2005). Posteriormente se adoptó el HLAC5 como base y se le incorporaron 20 kg/m^3 de fibras de acero buscando que se mantuviera la autocompactabilidad. Las proporciones de los materiales componentes y, los resultados de los ensayos en estado fresco y endurecido se presentan en la Tabla 3. Previamente, la AE fue sumergida en agua durante 24 horas para evitar la absorción de agua de mezclado y la consecuente pérdida de trabajabilidad.

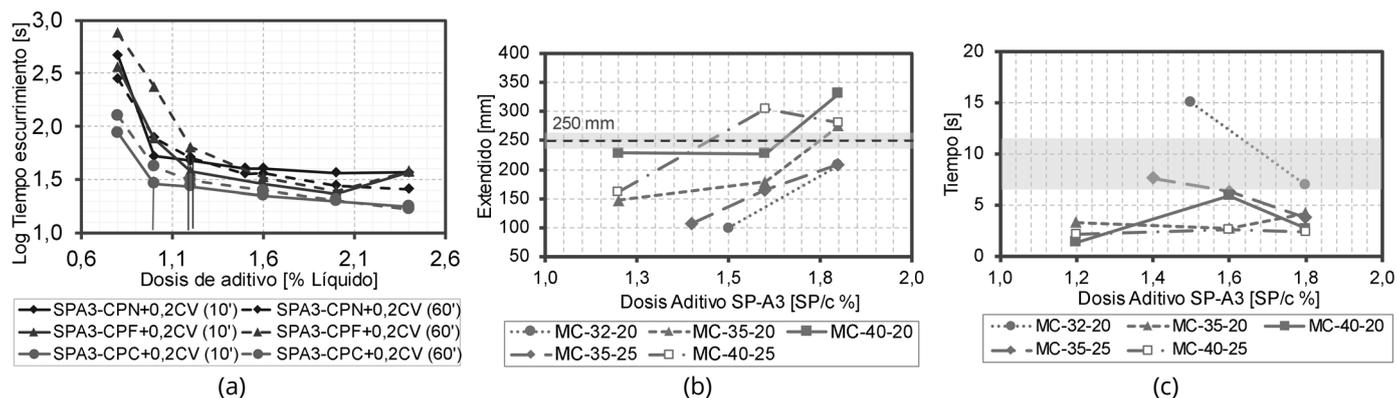


Figura 3. (a) Curvas de flujo en pastas empleando el aditivo SPA3 para la relación a/c de 0,33 y la combinación de los cementos con el 20% de CV. (b) Curvas de flujo de extendido en morteros y (c) curva de flujo en morteros mediante el V-funnel para a/c entre 0,3 y 0,4, con el CPC40 y VAF1/VAF2=30/70.

Mezclas de Hormigón		HLAC1	HLAC2	HLAC3	HLAC4	HLAC5	HLAARF	
Materiales Componentes [kg/m ³]	Cemento	397	466	501	533	506	513	
	CV	132	155	167	178	169	171	
	AF1	208	208	196	185	192	190	
	AF2	494	494	466	440	458	452	
	AE	435	435	410	387	410	404	
	Agua	227	199	214	227	216	219	
	SP-A3	7,6	10	8,4	6,4	9,1	9,2	
	FA	-	-	-	-	-	20	
Estado fresco	Extendido	SF [mm]	535	815	770	585	745	603
		T50 [s]	2,4	5,5	4,8	7,6	4,6	5,2
		IEV	2	3	3	2	1	1
	J-Ring	SFJ [mm]	-	790	765	510	740	545
		ΔJ [mm]	-	0	0	10	6	20
	Tv en V-funnel [s]	2	12	11	13	10	-	
L-box ratio [h2/h1]	1,0	0,9	0,9	4,0	0,9	-		
Estado endurecido.	Densidad [kg/m ³]	1892	1912	1926	1897	1851	1947	
	Resist. a compresión [MPa]	28-días	25,2	45,6	50,9	43,7	41,7	41,0
		60-días	32,9	49,5	51,7	50,7	48,2	50,4
		90-días	33,0	51,2	55,4	53,3	50,6	53,8

Tabla 3. Composición y propiedades de los hormigones elaborados.

Como se puede observar en la Tabla 3, la fluidez estuvo comprendida entre los 535 y 815 mm con T50 dentro del rango esperado de 2 a 9 s. Los tiempos T_V están en el rango de 2 a 13 s presentándose valores acordes a los HAC y el ΔJ menor a 20 mm, mostrando un grado aceptable de capacidad de pase. En los resultados del ensayo L-Box, la mayoría de los hormigones mostraron una relación de bloqueo próximos al límite mínimo recomendado por EFNARC de 0,8. En estado endurecido, con excepción del hormigón HLAC1, las resistencias a la compresión de las muestras superaron los 40 MPa por lo cual se clasifican como hormigón estructural de alta resistencia. A su vez, con excepción del HLAARF, la densidad aparente seca de todas las mezclas fue inferior a 1920 kg/m³, cumpliendo requisitos de HL estructural de alta resistencia según ACI 213R-03.

Conclusiones

De la propuesta de una metodología racional para diseñar HLAARFA y los resultados obtenidos en los ensayos sobre los hormigones elaborados se concluye que:

Mediante la optimización separada de la composición de la pasta y del esqueleto granular se obtuvieron HLAC con buenas propiedades de autocompactabilidad medidas mediante ensayos de extendido, T50, J-Ring, V-Funnel y caja en L.

Se obtuvieron hormigones HLAC con valores de resistencia de 25 MPa a 50 MPa a los 28 días y una densidad inferior a 1920 kg/m³, lo que clasificó a las mezclas como hormigón liviano estructural.

La incorporación de fibras en el HLAC influyó en las propiedades reológicas de la mezcla aumentando la viscosidad plástica con una consecuente reducción de la capacidad de flujo y la capacidad de sortear obstáculos. A su vez, las fibras incrementaron la densidad de la mezcla sin afectar la resistencia a compresión.

Teniendo en cuenta estos resultados, podemos afirmar que el método ha mostrado su eficacia y validez para obtener mezclas con buena capacidad de relleno, resistencia a la segregación, resistencia al paso y cumpliendo requisitos de HL estructural. El procedimiento de dosificación de HLAARFA emplea técnicas de ensayo sencillas y constituye un punto de partida para avanzar en el conocimiento de estos hormigones.

Referencias

- Concrete, S. C. (2005). The European guidelines for self-compacting concrete EFNARC. BIBM, et al, 22, 563. <https://www.ebeton.cz/wp-content/uploads/europeanguidelinesselfcompactingconcrete.pdf>
- Ferrara, L., Park, Y.D., Shah, S.P. (2007) A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research* 37, 957–971. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.03.014>.
- Filho Alferes R.S., Motezuki F.K., Romano R.C.O., Pileggi R.G., Figueiredo A.D. (2016) Evaluating the applicability of rheometry in steel fiber reinforced self-compacting concretes, *IBRACON Structures and Materials Journal*. Volume 9, Number 6. p. 969-988. ISSN 1983-4195 <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952016000600008>.
- 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. <https://doi.org/10.14359/12398>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.060>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.112>.
- Khayat, K. H., Kassimi, F., Ghoddousi P. (2014) Mixture Design and Testing of Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete, *ACI Materials Journal*. Volume 111, Number 2. p. 143-151. <https://doi.org/10.14359/51686722>.
- Klein, N.S., A. de la Fuente, A. Aguado, D. Maso, (2011) Lightweight self-compacting concrete reinforced with fibres for slab rehabilitation. *Mater. Construcc.* 61 239–256. <https://doi.org/10.3989/mc.2011.55509>.
- Li, J., Zhao, E., Niu, J., & Wan, C. (2021). Study on mixture design method and mechanical properties of steel fiber reinforced self-compacting lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 267, 121019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121019>.
- Li, J., Chen, Y., & Wan, C. (2017). A mix-design method for lightweight aggregate self-compacting concrete based on packing and mortar film thickness theories. *Construction and Building Materials*, 157, 621–634. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.141>.
- Mamirov, Miras (2019). "Using Theoretical and Experimental Particle Packing For Aggregate Gradation Optimization To Reduce Cement Content In Pavement Concrete Mixtures". *Civil Engineering Theses, Dissertations, and Student Research*. 136. <https://digitalcommons.unl.edu/civilengdiss/136>.
- Okamura, H., Ozawa, K., & Ouchi, M. (2000). Self-compacting concrete. *Structural Concrete*, 1(1), 3–17. <https://doi.org/10.1680/stco.2000.1.1.3>
- Shi C., Wu Z., Lv K., Wu L., (2015) A review on mixture design methods for selfcompacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 84 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.079>.
- Vakhshouri, B., & Nejadi, S. (2016). Mix design of light-weight self-compacting concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 4, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2015.10.002>.