



MÉTODO DE AJUSTE DE PASTAS Y ESQUELETO GRANULAR PARA EL DISEÑO DE HORMIGONES LIVIANOS AUTOCOMPACTANTES REFORZADOS CON FIBRA DE ACERO

PALACIO, Alberto J.¹, RAGGIOTTI, Bárbara B.² y ROUGIER, Viviana C.³

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

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

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

RESUMEN

Recientemente, la fabricación del hormigón alivianado autocompactante de alta resistencia reforzado con fibras de acero (HLAARFA) ha dado lugar a nuevas alternativas de aplicación en el campo de la ingeniería civil. Estas mezclas se pueden considerar como una suspensión de sólidos de diversos tamaños en una fase fluida continua. Por lo tanto, se requiere una comprensión del comportamiento reológico de las suspensiones cementosas con respecto al empaquetamiento de partículas, así como las características químicas y mineralógicas de los componentes finos. Este artículo busca caracterizar la interrelación entre las propiedades de flujo y la densidad de empaquetamiento de agregados en mezclas cementicias con el fin de facilitar el proceso de dosificación de los HLAARFA. Se combinaron metodologías de optimización y su rendimiento se valida a través de resultados en pruebas de laboratorio. Se identificaron los parámetros influyentes en el diseño de la mezcla para elaborar el protocolo de prueba necesario para la dosificación del HLAARFA.

Palabras claves hormigón liviano autocompactante, empaque de agregados, reología, dosificación

INTRODUCCIÓN

La combinación de la tecnología del hormigón liviano autocompactante (HLAC) y la incorporación de fibras para obtener hormigón liviano de alta resistencia autocompactado y reforzado con fibras de acero (HLAARFA) es muy atractiva, y tiene una amplia perspectiva de empleo, especialmente como refuerzo de elementos de hormigón armado [1]. Sin embargo, debido a su baja densidad acompañada de la autocompactación, y la contradicción entre cohesión y fluidez, el diseño del HLAARFA es complejo.

La teoría de la máxima densidad de empaquetamiento es un método de diseño de mezclas que se ha utilizado con éxito en estos hormigones especiales al determinar la relación óptima de vacíos en mortero y agregados [2]-[4]. Los pasos principales en este método son: (a) minimizar los vacíos relacionados con el agregado grueso, (b) minimizar la relación agua-cemento, (c) maximizar la densidad de los materiales de cementación y (d) optimizar la fluidez y los requisitos del hormigón fresco. Los trabajos realizados utilizando algunos agregados livianos han demostrado que el empleo de arcilla expandida (AE) como

agregado grueso brinda muy buenos resultados en HLAC [3]. Sin embargo, se requiere un método de diseño de mezcla específico que evite la segregación del material, así como la disminución de la resistencia por el peso reducido del agregado [5].

La reología de los materiales a base de cemento se puede describir mediante el modelo de Bingham, que involucra los parámetros de límite elástico (τ_0) y la viscosidad plástica (η_p). En el HLAC fresco el inicio del ascenso de las partículas de AE depende del límite elástico del mortero, la diferencia de densidad entre las partículas de agregado y el mortero, y el tamaño del agregado grueso. Una vez que ocurre el movimiento, la velocidad del ascenso se ve afectada además por la viscosidad plástica del mortero. Para lograr la trabajabilidad y estabilidad requeridas en las mezclas de HLAC, resulta fundamental el estudio del comportamiento reológico de pastas y morteros [6].

El objetivo de este estudio es optimizar las mezclas de HLAC para 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. 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. 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.

MÉTODOLÓGÍA EMPLEADA

Empaquetamiento de agregados. El grado de empaquetamiento de los agregados depende principalmente de tres parámetros: distribución del tamaño de las partículas (DTP), forma de las partículas y método de procesamiento del empaque. Los métodos de optimización se pueden dividir en tres grupos: las curvas de optimización, los modelos de empaque de partículas y los modelos de elementos discretos [7]. En este caso se emplean las curvas de clasificación para la determinación de la DTP más densa que fueron desarrollados para tratar con sistemas de partículas de grado continuo. Se emplea el método de Bolomey que propone una curva granulométrica de referencia teniendo en cuenta el tipo de agregado y la consistencia del hormigón; el de Andreasen modificado y el de Carneiro [8].

Modelo de Andreasen modificado: basándose en el modelo desarrollado por Andreasen [9], Funk y Dinger (F-D) desarrollan el modelo F-D, que se puede representar mediante la ecuación 1, $F(d)$ es el porcentaje de sólidos más fino que un tamaño de partícula dado d , d_L el tamaño de partícula más grande en el sistema, d_s es el más pequeño y n es el módulo de distribución que varía en un rango de 0,33 a 0,50 [10].

$$F(d) = 100 [(d^n - d_s^n) / (d_L^n - d_s^n)] \quad (1)$$

Modelo Carneiro: La expresión de Carneiro [11], viene dada por la ecuación 2 donde P_1 es el primer término de la progresión geométrica, P_r es la relación constante de masa de partículas retenidas entre un par de tamices, y N el número de intervalos de tamiz.

$$P_1 = 100 [(1 - P_r) / (1 - P_r^N)] \quad (2)$$

Se adoptó el parámetro $P_r = 0,70$, establecido como consistente para las mezclas de HAC [11], y el módulo de distribución fue considerado con $n = 0,25$. En ambos casos, con nueve intervalos de tamiz, $N = 9$, correspondiendo, en el segundo caso, a $d_L = 19$ mm y $d_s = 0,075$ mm. La composición del esqueleto granular se verifica experimentalmente, aplicando la IRAM 1548 basada en la ASTM C29, en busca de determinar las proporciones

con las que se consigue el menor volumen de vacíos mediante el cálculo de la densidad aparente (ρ_{ap}).

Ensayos sobre pastas y morteros. Para definir la composición óptima la pasta y para determinar la compatibilidad entre cementos y aditivos se emplea el Cono de Marsh [12]. El instrumento consiste en un cono de metal cuyas especificaciones geométricas están tomadas de las normas europeas EN 445 y P 18-358, similares a la ASTM C939. En este estudio, se utilizó un diámetro de boquilla de 8 mm. La curva de flujo obtenida indica el tiempo de flujo de la pasta con dosis crecientes de superplastificante (SP).

Se determinó la dosis de saturación (DS) y se evalúa la fluidez transcurridos 10 y 60 minutos después del mezclado con el fin de detectar los casos de incompatibilidad entre ligantes y aditivos [13]. A su vez, EFNARC [14] propone ensayos sobre pastas variando la relación a/mc. Se grafican las relaciones agua/finos arbitrarias vs. el diámetro de flujo relativo y se define como β_P a la ordenada al origen del gráfico obtenido realizando una regresión sobre los resultados. Con el valor de β_P , se puede calcular la relación agua/finos como 0,8-0,9 de β_P y luego, la relación a/mc en masa.

Para evaluar las características del mortero se emplea el ensayo de flujo utilizando el mini cono y el "V-Funnel" para morteros. Se determinó que estos ensayos tienen buena correlación con los dos parámetros reológicos τ_0 y η_p [15]. Altos valores de extendido indican una gran capacidad de deformación y bajos valores de flujo indican una alta viscosidad de la mezcla. En base al criterio definido por Okamura [16] y EFNARC [14] 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.

Ensayos sobre hormigones. Las propiedades del hormigón fresco se determinaron mediante flujo de asentamiento (SF), T50, el índice de estabilidad visual (IEV), tiempo de flujo en el embudo en V (T_V), extendido en anillo J (SFJ) altura de escalón en anillo J (ΔJ) y relación de bloqueo en la caja en L (L-box ratio) para evaluar los comportamientos de compactación de acuerdo con las normas IRAM 1890-1 e IRAM 1890-2, EFNARC y ASTM C1621. El objetivo establecido para la prueba de asentamiento invertido fue de 600 mm. En estado endurecido se determinó la densidad aparente seca y la resistencia a la compresión uniaxial luego de 28, 60 y 90 días de curado, según la norma IRAM 1546.

MATERIALES

Se empleó un único agregado grueso liviano de origen nacional constituido por AE clinquerizada. Como agregado fino se emplearon dos arenas silíceas naturales, una AF_1 con un módulo de finura de 1,91 y pasa tamiz 50 de 29,9 %; y una arena AF_2 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 AF_1 y 41,7 % para la AF_2 . El peso específico de ambas arenas es de 2,60 g/cm³. En la Figura 1 se muestran las distribuciones granulométricas de los agregados empleados.

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 que contenidos de 20 % - 25 % de esta adición producen buenos niveles resistentes en HAC, se adoptó un contenido en peso de 20 % [17][18].

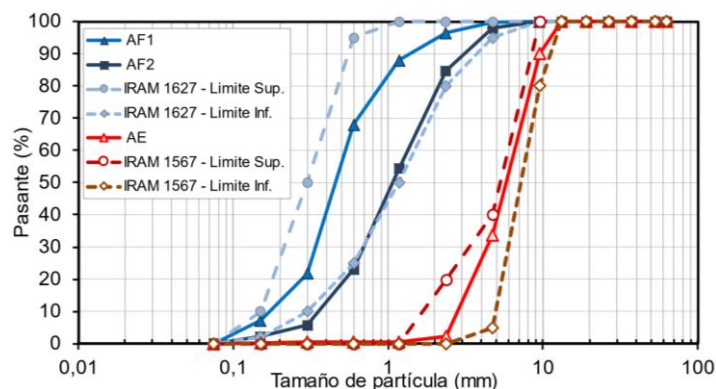


Figura 1: Granulometrías de agregados finos (AF_1 y AF_2) y el agregado grueso (AE).

Tabla 1: Características de los cementos empleados.

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

Los aditivos empleados fueron reductores de agua de alto rango (RAAR) con bases químicas de policarboxilatos y polímeros sintéticos modificados. Estos fueron identificados con las letras A y B según su marca comercial y con un número correlativo, 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.

Tabla 2: Características de los aditivos empleados.

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

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 4 muestra las DTP calculado utilizando el modelo F-D, el modelo de Carneiro y de Bolomey; así como también, dos DTP de prueba con las mezclas seleccionadas de agregados. Siguiendo la tendencia de la DTP del modelo de Carneiro, se consideró un 70 % de AE y 30 % del AF en peso (con una relación AF_1/AF_2 de 20/80). Por otra parte, también se consideró una mezcla del 40 % de AE y un 60 % de AF en peso (con AF_1/AF_2 de 30/70) en busca de aproximarse a la curva del modelo F-D y Bolomey.

De acuerdo con el método de la norma IRAM 1548, en la Figura 5(a) 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 5(b)).

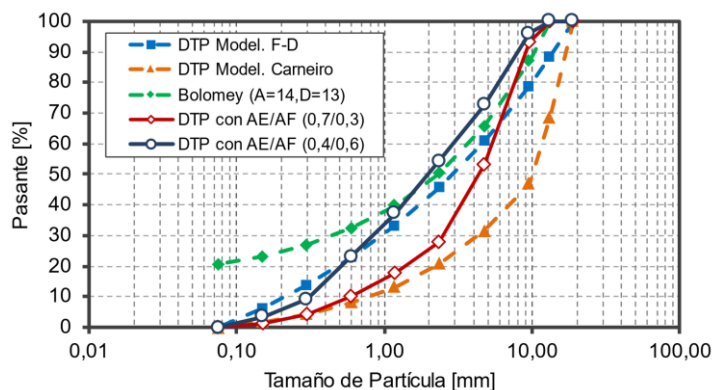


Figura 4: Distribución de tamaño de partículas para los modelos adoptados y para dos combinaciones con diferentes relaciones AE/AF.

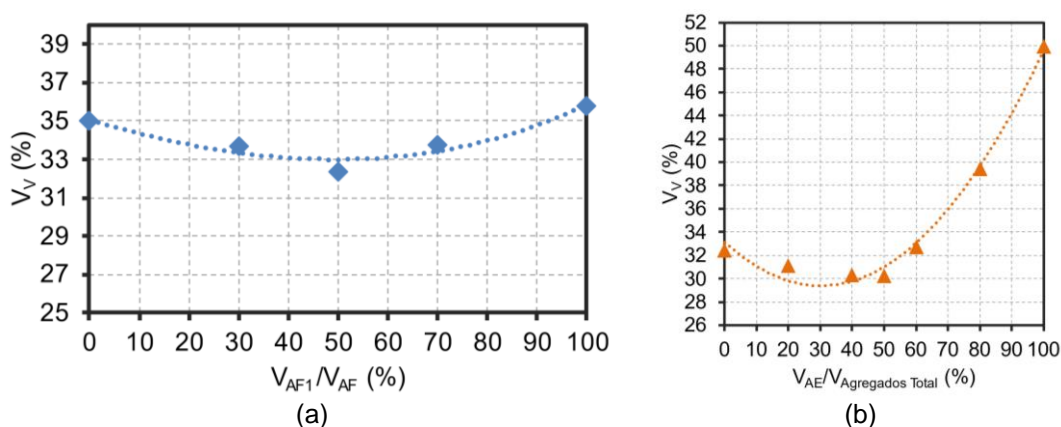


Figura 5: Variación del porcentaje de vacíos en la mezcla binaria, (a) de agregados finos (b) de AE y AF con $V_{AF1}/V_{AF2} = 30/70$.

En la Tabla 3 se presentan los ensayos para pastas elaboradas con cemento y 20 % de reemplazo en masa por CV. Al multiplicar β_P por los extremos del rango 0,8-0,9 se obtuvieron los valores de relación a/mc. El valor de a/mc de 0,33 empleado se encuentra entre los valores límites para todas las pastas, con lo cual se emplea este valor para el diseño de las mezclas.

Tabla 3: Rangos de relación a/mc obtenidos.

Cemento	%CV	β_P	V_a/V_{mc} inf.	V_a/V_{mc} sup.	a/mc inf.	a/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

En la Figura 6 puede observarse las gráficas flujo de los tres cementos con cada uno de los cinco aditivos. Por otro lado, en la Figura 7 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. Todos los morteros fueron elaborados con el aditivo SP-A3 por ser el de mejor compatibilidad en las pastas. El objetivo fue obtener los valores de tiempo de flujo entre 7 y 11 segundos y diámetros de escurrimiento de 250 mm.

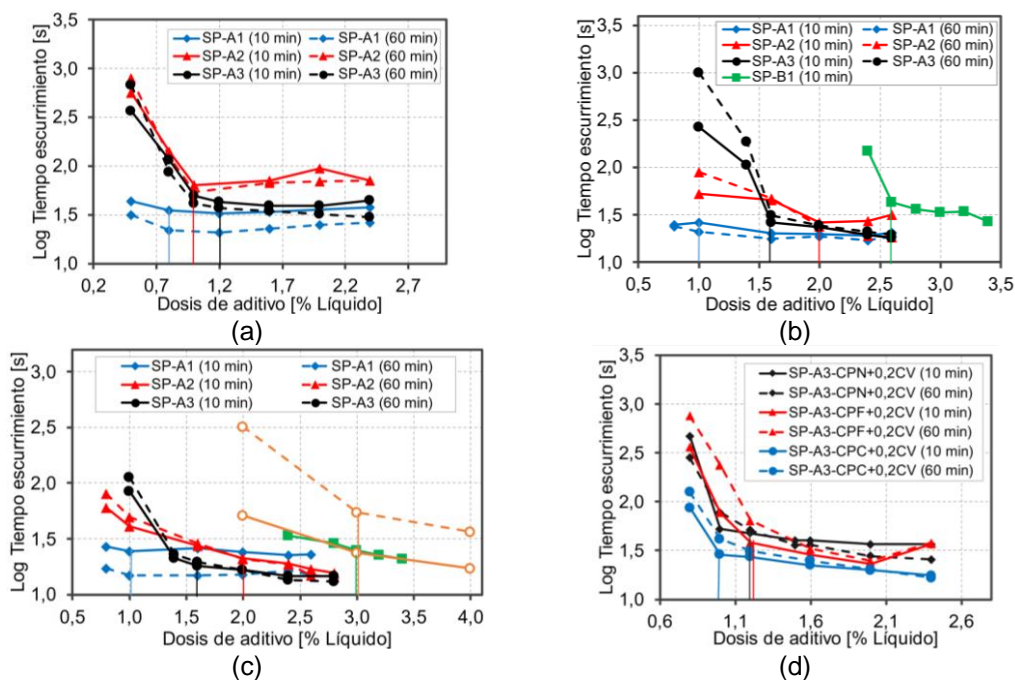


Figura 6: Curvas de flujo obtenidas en pastas empleando los aditivos en estudio para una relación $a/c = 0,33$ (a) CPN40 (b) CPF40 (c) CPC40 (d) cementos con 20 % de CV.

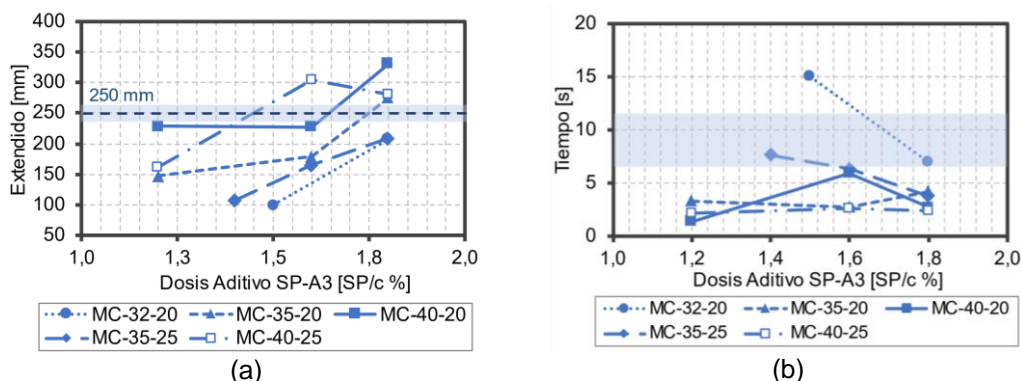


Figura 7: Curvas en morteros para a/c entre 0,3 y 0,4, con el CPC40 y $V_{AF1}/V_{AF2}=30/70$ (a) mediante flujo de extendido y (b) mediante el V-funnel.

Se puede observar en la Figura 5b que 30 % fue el menor porcentaje de vacíos de la mezcla de agregados para la relación AE/AF en volumen de 50/50. Esta relación fue la adoptada para la dosificación del hormigón ya que le corresponde una proporción de 40/60 en peso, que se ajusta a las distribuciones F-D y Bolomey. Para los agregados finos se adopta la proporción AF_1/AF_2 de 30/70 en peso, verificada en los morteros. A su vez, se fijaron la relación a/mc en 0,33 y la relación CV/cemento en 0,20. Para obtener los hormigones se optó por emplear el cemento CPC40 y el aditivo SP-A3 con dosis entre el 1,2 % y el 1,8 % obtenido en pastas y morteros respectivamente.

Se fabricaron hormigones con distintos contenidos de pasta, en el rango de 35 % - 42 % en volumen de acuerdo a lo recomendado por otros investigadores [14],[19]. 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 4. Previamente a la elaboración se saturó de agua la AE con el fin

de evitar la reducción de la relación a/c y, en consecuencia, la pérdida de trabajabilidad de la mezcla.

Tabla 4: Composición y propiedades de los hormigones elaborados.

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

Como se puede observar en la Tabla 4, la fluidez estuvo comprendida entre los 535 mm y 815 mm con T50 dentro del rango esperado de 2 s a 9 s. Los tiempos T_V están en el rango de 2 s a 13 s presentándose valores acordes a los HAC y el ΔJ menor a 20 mm, mostrando un grado aceptable de capacidad de pase [14]. En el caso de 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 [20].

CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en los ensayos sobre los hormigones elaborados se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- 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

- [1] 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.
- [2] Castro A., Ferreira F., "Effect of particle packing in the durability of high-performance concretes". Revista Ingeniería de Construcción; Vol 31, No 2 (2016), 104.
- [3] Ting T.Z.H., Rahman M.E., Lau H.H., Ting M.Z.Y., "Recent development and perspective of lightweight aggregates based self-compacting concrete". Construction and Building Materials 201. (2019). 763–777.
- [4] Li J., Zhao E., Niu J., Wan C., "Study on mixture design method and mechanical properties of steel fiber reinforced self-compacting lightweight aggregate concrete". Construction and Building Materials, 267, (2021), 121019.
- [5] Choi Y.W., Kim Y.J., Shin H.C., Moon H.Y., "An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight self-compacting concrete". Cement and Concrete Research, 36(9), (2006), 1595-1602.
- [6] Zhang M.H., Liu X., Chia K.S., "High-strength high-performance lightweight concrete-a review". In Proceedings of the 9th International Symposium on High Performance Concrete. New Zealand Concrete Society, (2011), (pp. 1-16).
- [7] Fennis S.A.A.M., Walraven J.C., "Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design". Heron, 57(2), (2012), 73-101.
- [8] Adekunle S.K., Ahmad S., Maslehuddin M., "The effect of aggregate packing on the performance of SCC using dune sand". In Proceedings of the Fifth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, USA. (2013) (pp. 12-15).
- [9] Andreasen A.H.M., "Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten)". Kolloid-Zeitschrift, 50, (1930) 217-228.
- [10] Wang X., Wang K., Taylor P., "Assessing Particle Packing Based Self-consolidating Concrete Mix Design Method". Construction and Building Materials, 70, (2014) 439-452.
- [11] Carneiro A.M.P., "Contribution to the study of the aggregate effect on the properties of mortars composed from grading curves". University of São Paulo, Brazil. (1999). p. 170.
- [12] Gomes P.C.C., Gettu R., Agulló L., Bernad C., "Mixture Proportioning of High Strength Self-Compacting Concrete. Using Simple Test Methods". 3º International Conference on High Performance Concrete, and performance and Quality of Concrete Structures. (2002), 1 – 4.
- [13] Donza H., Trezza M., "Estudio comparativo del comportamiento de aditivos superfluidificantes". In Proceedings of Congreso de Ingeniería, Estructuras, Materiales y Técnicas Constructivas hacia el Siglo XXI. (2000). Argentina.
- [14] EFNARC, "Specification and guidelines for self-compacting concrete". (2002). <http://www.enfrac.org>.
- [15] Mahdikhani M., Ramezani-pour A.A., "New methods development for evaluation rheological properties of self-consolidating mortars". Construction and Building Materials, 75, (2015). 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.094>.
- [16] Okamura H., Ozawa K., Ouchi M., "Self-Compacting Concrete". Str.. Conc., 1, 1, (2000), 3–17.
- [17] Amahjour F., Payá J., Pardo P., Borrachero M.V., Gurbés I., "Propiedades de lechadas de cemento fabricadas con cementos de tipo I y mezclas con cenizas volantes (CV) y humo de sílice (HS)". VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos. Aplicaciones para la fabricación de morteros. Cong. Nac. Mat. Comp. MATCOMP 99, (2002). 449-456, 1999.
- [18] Mamirov M., "Using theoretical and experimental particle packing for aggregate gradation optimization to reduce cement content in pavement concrete mixtures", (2019).
- [19] Cunha V., "Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (from Micro-Mechanics to Composite Behaviour)". (2010).
- [20] ACI, "Committee report 213R-03 structural lightweight aggregate concrete", American concrete institute (2003).