

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Efectividad de la dosificación de superplastificante sobre la dispersión de nanopartículas en el hormigón

Harry Brace ⁽¹⁾ y Emilio García-Taengua ⁽¹⁾

⁽¹⁾ School of Civil Engineering, University of Leeds, Inglaterra, Reino Unido.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5965>

RESUMEN

Las posibilidades que ofrecen las nanopartículas, y en particular la nanosílice (NS), en hormigones autocompactantes han motivado la investigación de sus efectos en pastas y morteros. Recientemente se han publicado estudios investigando los efectos de la adición de nanopletinas de grafeno (GNPs) u óxido de grafeno en pastas de cemento, con resultados prometedores. Sin embargo, las dificultades asociadas a la dispersión de nanopartículas sigue siendo un gran obstáculo. En el presente estudio se ha analizado el efecto de distintas dosificaciones de superplastificante sobre la dispersión de NS y GNP, medida indirectamente en pastas de cemento a través de su comportamiento en estado fresco, densidad y resistencia a compresión. Se ha prestado especial atención a la cuantificación de las interacciones entre dichos tres componentes, cuestión que no se había abordado anteriormente. La dosis de superplastificante se ha variado entre 0.6% y 1.2%, y se han considerado contenidos de NS y GNPs de hasta el 3% sobre el peso total de conglomerante. Se han detectado fuertes sinergias entre los contenidos en NS y GNPs y la dosis de superplastificante, y se presentan las ecuaciones predictivas obtenidas para los parámetros analizados.

PALABRAS CLAVE: aditivos, compatibilidad, fluidez, nanosílice.

1.- INTRODUCCIÓN

El desarrollo y manipulación de materiales a escala nanométrica es cada vez más asequible y escalable a gran variedad de procesos [1], y las posibilidades que ofrece la incorporación de nanopartículas a sistemas cementicios van desde la mejora de propiedades mecánicas y durabilidad hasta sus propiedades fotocatalíticas [1]–[3]. Sin embargo, la introducción de estos componentes en la producción de hormigón aún está lejos de consolidarse debido a tres factores [4]: su relativa novedad, su coste, y las dificultades asociadas a su dispersión homogénea en fresco, cuestión que ha motivado el presente trabajo.

La nanosílice (NS) es la nanopartícula que ha suscitado el mayor interés en cuanto a su aplicabilidad en hormigones. Su adición conlleva un aumento de la resistencia a

compresión [5], [6]. Debido a su elevado contenido en sílice y su finura, tiene un efecto puzolánico [7]. Además, las partículas de NS actúan como centros de nucleación para el desarrollo de los productos de hidratación del cemento, y contribuyen al llenado de poros, lo que se ha venido denominando como “efecto filler” [5], [7]. Sin embargo, adolecen de una baja dispersabilidad durante el amasado, dificultando su distribución homogénea y por tanto el aprovechamiento de su potencial [8], [9]. Para minimizar este problema la NS suele utilizarse predispersada en forma de solución acuosa o hidrosol, pero aun así, debido a la liberación de cationes Ca^{2+} , Na^{+} y K^{+} que se produce cuando el cemento entra en contacto con el agua, las partículas de NS tienden a reaglomerarse [5]. Además, su elevada superficie específica tiende a incrementar la demanda de agua, con la consiguiente penalización de la trabajabilidad de la mezcla, que no ayuda a una mejor dispersión [8].

Las nanoplestinas de grafeno (GNPs) son partículas bidimensionales constituidas por átomos de carbono, y constituyen un material relativamente nuevo. Su introducción en sistemas cementicios puede mejorar sus propiedades en estado endurecido de forma más eficiente que con las nanofibras o nanotubos de carbono y mejor relación coste-beneficio [10]. Además de una mejor resistencia a compresión, a tracción o en flexotracción [11], la reducida resistividad eléctrica de las GNPs podría explotarse en el desarrollo de estructuras de hormigón capaces de automonitorizarse [12]. El principal problema asociado a las GNPs vuelve a ser su dispersabilidad [13]. Mediante ultrasonificación se puede conseguir una dispersión homogénea en medio acuoso [13]–[15], pero dicha técnica no es escalable a la producción a gran escala y además puede producirse una reaglomeración de las nanopartículas cuando dicha preparación entra en contacto con el cemento [15]. Esto se consigue mejorar mediante la modificación superficial de las GNPs, incorporando grupos hidroxilo dando lugar al óxido de grafeno (GO), con elevado carácter hidrofílico y mucho más dispersable [16]. Sin embargo, con esta modificación superficial se pierde la electroconductividad con la consiguiente limitación de sus potenciales aplicaciones [3].

Tanto la NS como las GNPs, adicionadas a la pasta de cemento, mortero u hormigón, son capaces de introducir una substancial mejora en las propiedades en estado endurecido. Sin embargo, su difícil dispersión va en detrimento de la trabajabilidad y dificulta el total aprovechamiento de su potencial, aspectos ambos de particular interés en relación con los hormigones autocompactantes. Estudios preliminares indican que tanto la NS como las GNPs se dispersan mejor con la introducción de un aditivo superplastificante basado en éteres policarboxílicos. Dichas cuestiones son las que han motivado el presente estudio. Además, se espera que la dispersabilidad de tanto la NS como las GNPs mejore cuando se utilizan conjuntamente, pues así se ha detectado, por ejemplo, en el caso del GO cuando se adiciona en combinación con el humo de sílice [15], [16].

2.- PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1.- Variables consideradas y definición de las pastas ensayadas

En el presente estudio se produjeron y ensayaron dieciocho pastas de cemento distintas, variándose el contenido en NS, el contenido en GNPs, y la dosis de aditivo superplastificante. En cada amasada se produjo suficiente volumen de pasta para llevar a

cabo los siguientes ensayos: cono de Marsh, mesa de sacudidas, y compresión simple, además de la determinación del peso específico.

Tanto la NS como las NGPs se consideraron a tres niveles: 0%, 1% y 3% sobre el peso de cemento. En el caso de la NS, se corrigieron las cantidades a añadir para tener en cuenta únicamente su fracción sólida. Se decidió fijar el rango de variación entre 0% y 3% puesto que los valores óptimos del contenido en NS según diversos estudios previos oscila entre el 1.5% y el 2.5% [5], y los contenidos en GNPs en estudios similares son 5% o inferiores. El aditivo se consideró a dos niveles: 0.6% y 1.2% sobre el peso de cemento, de acuerdo con los valores mínimo y máximo recomendados por el fabricante. Tras unos ensayos preliminares, la relación agua/conglomerante se fijó en 0,4 y se mantuvo constante para todas las mezclas.

La composición de cada una de las dieciocho pastas consideradas, así como los valores medios obtenidos de los ensayos realizados, se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición de las pastas ensayadas y valores medios de los resultados experimentales.

<i>Componentes (% sobre peso de cemento)</i>			<i>Tiempo de flujo t (s)</i>	<i>Escurrimiento D (mm)</i>	<i>Peso específico ρ (kg/m³)</i>	<i>Resistencia a compresión (MPa)</i>
<i>GNPs</i>	<i>NS</i>	<i>SP</i>				
0,0	0,0	0,6	7,3	-	2126,4	34,5
0,0	0,0	1,2	6,5	-	2136,8	40,1
0,0	1,0	0,6	8,2	-	1983,6	44,0
0,0	1,0	1,2	7,5	-	2006,4	46,9
0,0	3,0	0,6	-	213	1972,3	50,9
0,0	3,0	1,2	39,8	230	1968,3	54,0
1,0	0,0	0,6	73,8	268	2087,4	74,4
1,0	0,0	1,2	7,8	-	2068,0	76,6
1,0	1,0	0,6	-	240	2026,0	74,5
1,0	1,0	1,2	7,7	-	2058,6	81,4
1,0	3,0	0,6	-	193	2082,6	76,6
1,0	3,0	1,2	-	195	2017,2	77,3
3,0	0,0	0,6	-	180	2112,1	57,2
3,0	0,0	1,2	-	220	2097,4	66,5
3,0	1,0	0,6	-	205	2086,7	56,6
3,0	1,0	1,2	-	225	2072,8	73,6
3,0	3,0	0,6	-	180	2063,8	59,2
3,0	3,0	1,2	-	185	2035,5	60,8

2.2.- Materiales

Se utilizaron cemento Portland de clase CEM I 52.5N conforme a la norma EN 197-1:2011, agua corriente, y un aditivo superplastificante a base de éteres policarboxílicos. La NS utilizada fue una suspensión en medio acuoso estabilizada con sodio, con un contenido en SiO₂ del 40% en peso y un tamaño medio de partícula de 12 nm. Se utilizaron GNPs con una superficie específica de 500 m²/g.

2.3.- Métodos experimentales

En la producción de todas las pastas se siguió el mismo procedimiento, y se respetó la misma duración para cada una de las operaciones. En primer lugar, para cada pasta se premezcló el aditivo, la NS, y las GNPs junto con el agua en sus cantidades correspondientes. La mitad de esta preparación se vertía en la amasadora, programable y con una capacidad de 4.5 l, junto con el cemento, mezclando a 140 rpm durante 150 segundos. Transcurrido este tiempo, se detenía la amasadora durante 30 segundos para recuperar el material adherido con una espátula. Después se añadía la cantidad restante de la preparación, para continuar amasando a 140 rpm durante 60 segundos. A continuación se aumentaba la velocidad de la amasadora a 285 rpm, manteniéndose durante 120 segundos, para finalizar con 60 segundos a 140 rpm antes de considerarse finalizada la amasada.

Para medir la fluidez se empleó el cono de Marsh, de dimensiones conformes con la norma EN 445:2007. Las superficies interiores del cono se premojaban para minimizar la fricción con la pasta durante el ensayo, que se realizaba inmediatamente después del amasado, llenando el cono con 900 ml de pasta y midiendo el tiempo que tardaba en salir del cono un volumen de 700 ml. La mesa de sacudidas, conforme a la norma EN 1015-3, también se premojaba previamente, y el ensayo se llevaba a cabo inmediatamente después del ensayo de fluidez. El molde se rellenaba hasta aproximadamente la mitad, aplicando una compactación de 10 golpes antes de terminarlo de rellenar y aplicar la misma compactación, tras lo cual se levantaba el molde y se aplicaban 15 sacudidas. El escurrimiento se midió en dos direcciones perpendiculares, determinándose el valor promedio.

Para los ensayos de compresión, con cada una de las pastas se fabricaron tres probetas cúbicas de 50 mm de lado. Después de llenar los moldes, se vibraban durante 15 segundos y se almacenaban cubiertos con plástico durante 24 h. Tras ser desmoldadas, las probetas se conservaban inmersas en agua a temperatura constante hasta la edad de 21 días, cuando se las pesaba y se ensayaban a compresión simple de acuerdo con la norma EN 12390-3.

3.- RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados experimentales se presentan en la Tabla 1. La metodología de análisis se basó en la regresión lineal múltiple, obteniéndose ecuaciones predictivas para cada uno de los parámetros medidos en función de las dosis de NS, GNPs y aditivo superplastificante. Dichas ecuaciones se simplificaron mediante regresión stepwise hasta incluir únicamente términos estadísticamente significativos. Para la interpretación y discusión de los

resultados, se ha recurrido a la representación gráfica de estas ecuaciones, o superficies de respuesta.

3.1.- Comportamiento en fresco: fluidez y escurrimiento

Para el análisis de la fluidez medida con el cono de Marsh, no se consideró directamente el tiempo de flujo, t (segundos), sino su inversa, $1/t$ para poder realizar el análisis cuantitativo sin descartar los casos donde la pasta era demasiado espesa como para fluir ($1/t = 0$). Tras el análisis de regresión, se obtuvo la siguiente ecuación ($R^2 = 0.92$), donde A, G, y S son las dosis de aditivo, GNPs y NS respectivamente, en porcentaje sobre el peso de cemento:

$$\frac{1000}{t} = 67.8 + 77A - 220G + 61G^2 + 163AG - 14AS^2 + 4GS^2 - 58AG^2 \quad (1)$$

En la Figura 1 se muestran las superficies de respuesta correspondientes a contenidos en grafeno del 0.5%, 1.5% y 2.5%, en función de las dosificaciones de aditivo y de nanosílice. Con contenidos en grafeno por debajo del 0.5%, la adición de nanosílice no perjudica seriamente la fluidez de las pastas siempre que su contenido no supere el 2%, y las dosis necesarias de aditivo son relativamente bajas. Por el contrario, un mayor contenido en grafeno hace necesario reducir el contenido en nanosílice al 1.5% o incluso al 1% para conseguir un buen nivel de fluidez, precisándose dosis de aditivo más altas. Con un contenido en grafeno del 1.5%, la dosis mínima de aditivo para mantener el tiempo de flujo t por debajo de los 50 segundos es 0.75% en ausencia de nanosílice, o 0.85% con un 2% de nanosílice. Si el contenido en grafeno es del 2.5%, la dosis mínima de aditivo aumenta llegando al 1% o 1.1% (sin nanosílice o con un 2% de nanosílice, respectivamente).

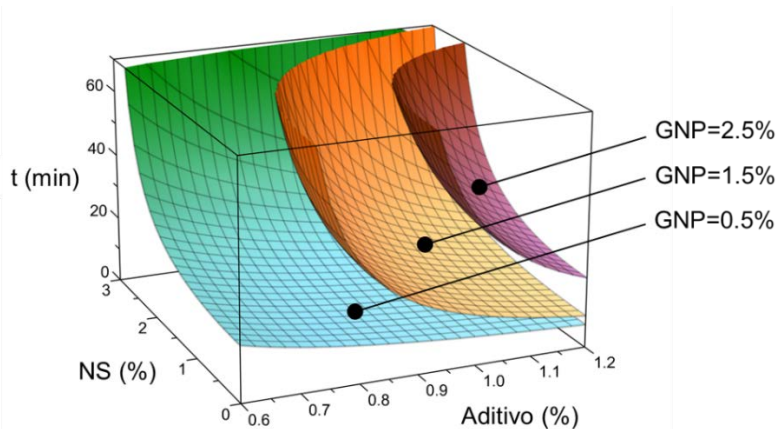


Figura 1. Tiempos de flujo en el cono de Marsh en función de la dosis de nanosílice y aditivo, para distintos contenidos de grafeno.

Sin embargo, las consideraciones derivadas de la ecuación (1) y la Figura 1 no son suficientes para la interpretación de aquellos casos en los que una elevada viscosidad hace que la pasta no fluya a través del cono de Marsh. En este sentido, los resultados de

escurrimiento obtenidos mediante la mesa de sacudidas complementan el análisis. Para proceder a su interpretación, no se consideraron directamente los valores de escurrimiento, D (mm), sino su inversa, $1/D$ (mm^{-1}), para poder definir cuantitativamente aquellos casos con excesivo escurrimiento ($1/D = 0$). Se obtuvo la siguiente ecuación ($R^2 = 0.94$):

$$\frac{10000}{D} = -2.5 + 81G + 5.3S^2 - 20.3G^2 - 65AG - 1.5GS^2 + 20.7AG^2 \quad (2)$$

Las superficies de respuesta para el escurrimiento se muestran en la Figura 2. Para contenidos en grafeno por debajo del 0.5%, la variación de la dosis de aditivo no provoca grandes cambios en los valores de escurrimiento, que son relativamente altos siempre que el contenido en nanosílice no supere el 2%. Sin embargo, la adición de nanosílice al 2% o más reduce considerablemente los niveles esperables de escurrimiento, lo cual es consistente con las observaciones hechas en relación con el tiempo de flujo. Sin embargo, cuando se aumenta el contenido de grafeno al 2.5%, la dosis de aditivo cobra una mayor importancia. Si la dosis de aditivo es baja, la variación de la cantidad de nanosílice dentro de los límites considerados apenas modifica los valores de escurrimiento, que se mantienen considerablemente bajos.

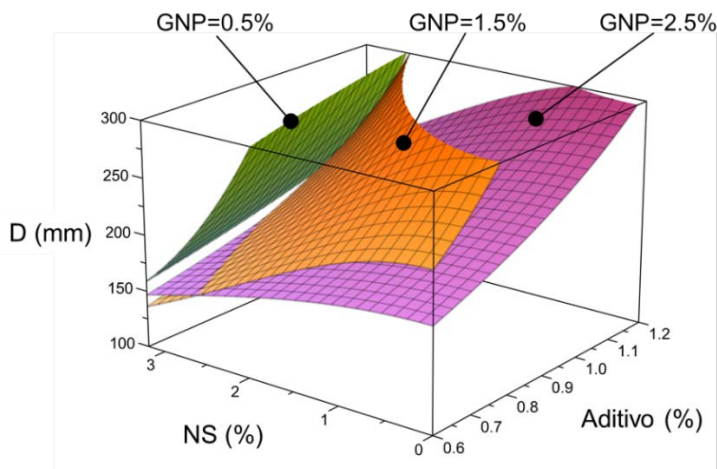


Figura 2. Escurrimiento en función de la dosis de nanosílice y aditivo, para distintos contenidos de grafeno.

Por el contrario, aumentando la dosis de aditivo se obtienen valores de escurrimiento más elevados, incluso con contenidos altos de nanosílice. Si se asume $D = 250$ mm como valor representativo de las pastas con un buen nivel de escurrimiento, para cada contenido en grafeno se puede estimar la dosis necesaria de aditivo en función del contenido en nanosílice. Así, si el contenido en grafeno es del 2.5%, se precisaría una dosis de aditivo del 1% en ausencia de nanosílice, subiendo al 1.1% o 1.4% si el contenido en nanosílice es del 1.5% o 3% respectivamente. Dicha tendencia (a mayor dosis de aditivo, mayor escurrimiento) es más pronunciada para valores intermedios del contenido en grafeno. Para

un contenido en grafeno del 1.5%, la dosis de aditivo necesaria es del 0.6% en ausencia de nanosílice, y del 0.8% o 1.2% si el contenido en nanosílice es del 1.5% o 3% respectivamente.

3.2.- Peso específico

Para los resultados de peso específico de las pastas endurecidas ρ (kg/m^3) se obtuvo la siguiente ecuación ($R^2 = 0.92$):

$$\rho = 2124.7 - 157S + 35S^2 + 90SG - 56AG - 15SG^2 + 15AG^2 - 12GS^2 \quad (3)$$

En la Figura 3 se representan tres superficies de respuesta para el peso específico en función de las dosificaciones de aditivo y nanosílice, para contenidos en grafeno del 0.5%, 1.5% y 2.5%. Para contenidos bajos en grafeno, se observa una tendencia cuadrática con respecto a la dosificación de nanosílice. Si se descarta la adición de nanosílice en niveles superiores al 2% por la reducida trabajabilidad, los valores de peso específico indican que el aumento del contenido en nanosílice provoca una reducción de la compacidad de la pasta endurecida, algo que incidiría negativamente en la durabilidad de los hormigones basados en este ligante. Sin embargo, el incremento del contenido en grafeno se observa beneficioso en tanto que modera dicha tendencia, e incluso prácticamente la anula si se dosifica al 2.5%. Por lo tanto, estos resultados confirman que la adición de grafeno en combinación con la nanosílice mejora la compatibilidad entre cemento, nanosílice y aditivo.

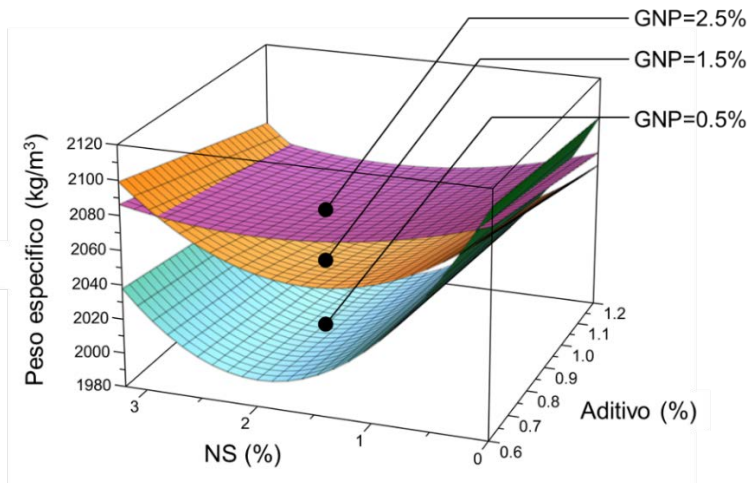


Figura 3. Peso específico en función de la dosis de nanosílice y aditivo, para distintos contenidos de grafeno.

3.3.- Resistencia a compresión

Para los valores de resistencia a compresión, f_c (MPa), se obtuvo ($R^2 = 0.98$):

$$f_c = 37.1 + 53G - 16G^2 + 2S^2 + 11AS - 6SG + 1.3SG^2 + 1.5AG^2 - 4AS^2 \quad (4)$$

La Figura 4 muestra las superficies de respuesta para la resistencia a compresión en función de los contenidos en nanosilíce y grafeno, considerando el aditivo dosificado al 0.6% y al 1.2%. Se observa que la variación de la dosis de aditivo dentro de los límites recomendados por el fabricante no tiene un efecto directo notable en la resistencia a compresión, y que la cantidad de nanosilíce tiene una influencia moderada. Sin embargo, la adición de grafeno modifica enormemente la resistencia a compresión, y su contenido óptimo se sitúa en el 1.7%. El contenido óptimo de grafeno no varía sustancialmente con el contenido en nanosilíce ni con la dosis de superplastificante, manteniéndose entre 1.65% y 1.73%. En estas cantidades, la adición de grafeno aumenta la resistencia a compresión de 37 MPa a 85 MPa, lo que representa un incremento del 129%.

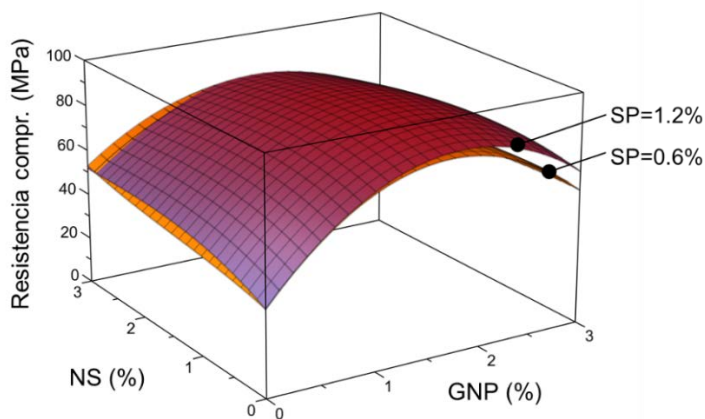


Figura 4. Resistencia a compresión en función de la dosis de nanosilíce y grafeno.

4.- CONCLUSIONES

Este estudio se ha basado en los resultados experimentales obtenidos a partir de una serie de pastas de cemento con distintos contenidos en nanosilíce, nanopletinas de grafeno y superplastificante. Su comportamiento en fresco se analizó mediante los ensayos del cono de Marsh y la mesa de sacudidas, y en estado endurecido, a través de su peso específico y la resistencia a compresión a 28 días. Las principales conclusiones son:

- Se han detectado fuertes interacciones entre los contenidos en NS y GNPs y entre éstos y la dosis de superplastificante, en todas las propiedades analizadas.
- El nivel de fluidez no se ve perjudicado por la adición de nanosilíce en dosis no superiores al 2% cuando el contenido en grafeno es inferior al 0,5%, y las dosis de aditivo necesarias para mantener una buena fluidez son relativamente bajas.

- La adición de grafeno por encima del 1% hace necesario reducir el contenido en nanosílice por debajo del 1.5% para conseguir una buena fluidez, precisándose dosis de aditivo un poco más elevadas.
- Para el análisis de aquellos casos en los que una elevada viscosidad impide que la pasta fluya a través del cono de Marsh, se recurrió a los resultados de escurrimiento en mesa de sacudidas. Para conseguir un nivel de escurrimiento adecuado, la dosis necesaria de aditivo aumenta con los contenidos en nanosílice y grafeno, especialmente para contenidos en grafeno por encima del 2.5%.
- El análisis del peso específico ha confirmado que la adición de grafeno tiene un efecto beneficioso sobre la dispersión de las partículas de nanosílice, mejorando la compacidad de la pasta endurecida. Este hallazgo confirma que la compatibilidad entre nanosílice y cemento mejora con la introducción del grafeno.
- La adición de grafeno aumenta sustancialmente la resistencia a compresión. Su contenido óptimo se sitúa en torno al 1.7% y no depende del contenido en nanosílice o la dosis de aditivo, y la resistencia a compresión puede aumentar hasta un 129%.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su gratitud a las empresas BASF y AkzoNobel por la provisión de los materiales necesarios para este estudio, así como al personal técnico de los laboratorios de materiales y estructuras de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Leeds por su asistencia y cooperación.

REFERENCIAS

- [1] F. Sanchez and K. Sobolev, “Nanotechnology in concrete - A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 11, pp. 2060–2071, 2010.
- [2] R. Sengupta, M. Bhattacharya, S. Bandyopadhyay, and A. K. Bhowmick, “A review on the mechanical and electrical properties of graphite and modified graphite reinforced polymer composites,” *Prog. Polym. Sci.*, vol. 36, no. 5, pp. 638–670, May 2011.
- [3] T. Tong, Z. Fan, Q. Liu, S. Wang, S. Tan, and Q. Yu, “Investigation of the effects of graphene and graphene oxide nanoplatelets on the micro- and macro-properties of cementitious materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 106, pp. 102–114, Mar. 2016.
- [4] P. J. M. Bartos, “Nanotechnology in Construction: a Roadmap for Development,” in *Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspective*, 2009, pp. 1–14.
- [5] E. Garcia-Taengua, M. Sonebi, K. M. A. Hossain, M. Lachemi, and J. Khatib, “Effects of the addition of nanosilica on the rheology, hydration and development of the compressive strength of cement mortars,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 81, pp. 120–129, 2015.

Efectividad de la dosificación de superplastificante sobre la dispersión de nanopartículas...

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

- [6] P. Hou, S. Kawashima, D. Kong, D. J. Corr, J. Qian, and S. P. Shah, “Modification effects of colloidal nanoSiO₂ on cement hydration and its gel property,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 45, no. 1, pp. 440–448, Feb. 2013.
- [7] B. Lothenbach, K. Scrivener, and R. D. Hooton, “Supplementary cementitious materials,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 12, pp. 1244–1256, Dec. 2011.
- [8] E. Horszczaruk, E. Mijowska, K. Cendrowski, S. Mijowska, and P. Sikora, “Effect of incorporation route on dispersion of mesoporous silica nanospheres in cement mortar,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 66, pp. 418–421, 2014.
- [9] G. Quercia, G. Hüsken, and H. J. H. Brouwers, “Water demand of amorphous nano silica and its impact on the workability of cement paste,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 2, pp. 344–357, 2012.
- [10] B. Z. Jang and A. Zhamu, “Processing of nanographene platelets (NGPs) and NGP nanocomposites: A review,” *J. Mater. Sci.*, vol. 43, no. 15, pp. 5092–5101, 2008.
- [11] X. Cui *et al.*, “Mechanical, thermal and electromagnetic properties of nanographite platelets modified cementitious composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 93, pp. 49–58, 2017.
- [12] S. Sun *et al.*, “Nano graphite platelets-enabled piezoresistive cementitious composites for structural health monitoring,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 136, pp. 314–328, 2017.
- [13] B. Han, S. Sun, S. Ding, L. Zhang, X. Yu, and J. Ou, “Review of nanocarbon-engineered multifunctional cementitious composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 70, pp. 69–81, Mar. 2015.
- [14] H. Shao, B. Chen, B. Li, S. Tang, and Z. Li, “Influence of dispersants on the properties of CNTs reinforced cement-based materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 131, pp. 186–194, 2017.
- [15] X. Li *et al.*, “Incorporation of graphene oxide and silica fume into cement paste: A study of dispersion and compressive strength,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 123, pp. 327–335, 2016.
- [16] Y. Shang, D. Zhang, C. Yang, Y. Liu, and Y. Liu, “Effect of graphene oxide on the rheological properties of cement pastes,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 96, pp. 20–28, 2015.