

Luis Fernando Molina-Prieto
lmolinaprieto@gmail.com

María Fernanda Garzón Castellanos
maria.garzon3@estudiantes.uamerica.edu.co



P

**ropiedades de concretos y morteros
modificados con nanomateriales:
estado del arte**

*Properties of concretes and mortars
modified with nanomaterials:
State of the art*

Primera versión recibida 1 de Marzo 2017
Revisado 11 de Abril 2017
Versión final aprobada 15 de Agosto 2017

Resumen

El artículo revisa los avances de la nanotecnología en los campos de la arquitectura, la ingeniería civil y la industria de la construcción, con énfasis en los seis nanomateriales más utilizados actualmente en esa industria. Se concluye que la nanotecnología amplía las potencialidades del concreto y reduce su impacto ambiental, porque logra mayor resistencia mecánica con menores dimensiones de los elementos estructurales.

Palabras claves

Nanopartículas, propiedades mecánicas, propiedades químicas, concretos.

Abstract

The article studies some of the properties of the concrete modified with nanomaterials, being the most outstanding: increased compressive, flexural, traction and shear strength; increase of modulus of elasticity; reduction of porosity and permeability minimization; capacity of self-cleaning; better fluidity of the liquid mixture and improvement of plasticity. Emphasis is placed on six nanomaterials as being the most used in the construction industry: Nano-silica, Titanium Nano-Dioxide, Nano-Magnetite, Calcium Nano-Carbonate, Aluminum Nano-Trioxide and Carbon Nanotubes. It is concluded that nanotechnology extends the potential of concrete and reduces its environmental impact, because it achieves greater mechanical resistance with smaller dimensions of the structural elements.

Keywords

Nanoparticles, mechanical properties, chemical properties, concretes.

Para citar este artículo: Molina-Prieto, L. F. y Garzón Castellanos, M. F. (2017). Propiedades de concretos y morteros modificados con nanomateriales: estado del arte. *Arquetipo*, volumen (14), pp 81-98

Propiedades de concretos y morteros modificados con nanomateriales: estado del arte*

Properties of concretes and mortars modified with nanomaterials: State of the art

83

Luis Fernando Molina-Prieto**
lmolinaprieto@gmail.com

María Fernanda Garzón Castellanos***
maria.garzon3@estudiantes.uamerica.edu.co

Introducción

Desde 1824 —cuando fue patentado el cemento Portland— el concreto ha consolidado una excelente reputación como material de construcción, debido a sus múltiples ventajas: disponibilidad de materias primas en todo el mundo; bajo costo; facilidad de manejo; moldeamiento durante los procesos de construcción; excelente potencial cuando se toma como base para el diseño; alto rendimiento y versatilidad en obra; y además, por sus valiosas propiedades como material estructural en edificaciones y obras civiles de toda índole. En consecuencia, es un material utilizado masivamente por la industria de la construcción; su producción mundial se estima en 20.000 millones de toneladas por año (Balaguru y Chong, 2006; Jafarbeglou, Abdouss y Ramezaniapur, 2015).

No obstante, tan alto consumo de concreto exige una enorme producción de cemento, y las industrias cementeras no solo requieren enormes cantidades de energía, sino que emiten al aire grandes cantidades de CO₂ y otros gases de efecto invernadero; por tanto, contribuyen con dos fenómenos ambientales que impactan la existencia de la vida sobre la tierra: el calentamiento global y el cambio climático (Eskandari, Vaghefi y Kowsari, 2015). Para

*El artículo proviene de la investigación 'Nano + Arquitectura', financiada por la Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia

**Profesor-Investigador Facultad de Arquitectura, Universidad de América. Grupo de investigación territorio y habitabilidad

***Estudiante de séptimo semestre de Ingeniería Química, Universidad de América. Semillero de investigación Arquitectura Universidad de América

reducir los efectos negativos del uso intensivo del concreto, se experimenta actualmente con nanopartículas que pueden incrementar las propiedades estructurales del concreto, y por ende, tienen el potencial de disminuir, al menos en parte, la producción de cemento a nivel global (Quercia y Brouwers, 2010).

84

Durante las dos últimas décadas — gracias a los avances en el campo de la nanotecnología¹—, características propias del concreto como son la resistencia a la compresión, la tracción, la flexión y el corte, se han incrementado significativamente, abriendo un nuevo horizonte de potencialidades a un material de por sí altamente versátil, puesto que gracias a la nanotecnología, es posible manipular los concretos y los morteros a nivel atómico (Safiuddin, Gonzalez, Cao y Tighe, 2014). La adición de nanomateriales durante la preparación de la mezcla modifica el comportamiento mecánico del concreto en sus dos fases: líquida (mayor fluidez) y sólida (mayor resistencia), así como en las interfaces líquido-sólido y sólido-sólido, o sea, durante los respectivos procesos de fraguado (o endurecimiento) y curado del

material. Los concretos modificados con nanopartículas tienen un enorme potencial de aplicación en los campos de la arquitectura y la ingeniería, y pueden transformar o replantear, a mediano plazo, las metodologías y procedimientos convencionales de la tecnología del hormigón (Sanchez y Sobolev, 2010; Yousef Mohamed, 2015).

Los nano-aditivos potencializan tres aspectos del hormigón: su plasticidad, resistencia mecánica y durabilidad. En cuanto a la plasticidad cabe subrayar que, en muchas ocasiones, las armaduras metálicas forman densas redes que impiden la distribución homogénea de la mezcla durante los procesos de vaciado y fundición en los moldes o encofrados. Esta situación deriva en pérdidas significativas en cuanto a la resistencia física de vigas, columnas, placas y otros elementos, reduciendo su desempeño como componentes estructurales de las construcciones. Algunas nanopartículas, como las de dióxido de silicio (SiO_2), dióxido de titanio (TiO_2) y óxido de zinc (ZnO), aportan mayor fluidez a la mezcla —de cemento, arena, agregados y agua—, permitiendo que ingrese de manera más eficiente en los rincones y lugares de difícil acceso bajo tales condiciones (Liu, Li y Xu, 2015).

Con respecto a la resistencia mecánica, varios materiales de dimensiones nanométricas se han agregado al concreto con resultados provechosos. De acuerdo con Azizi Shirkoohi (2016), las nanopartículas de óxido de hierro (FeO) aumentan la resistencia a la compresión y a la flexión. Las de cemento —cemento molido hasta que el polvo alcanza la escala nanométrica o intervenido

¹ El 29 de diciembre de 1959 el científico norteamericano Richard Feynman, quien recibiría el Premio Nobel de física en 1965, dijo en una conferencia: '*There's plenty of room at the bottom*' ['hay mucho sitio al fondo']. Con esa frase se inició el estudio de un mundo diminuto que abarca objetos que miden entre 1 y 999 nanómetros, es decir, la milmillonésima parte de un metro. Algo supremamente reducido si consideramos que un cabello humano mide cerca de 10.000 nanómetros de diámetro. Quince años después, Norio Tanaguchi acuñó el término 'nanotecnología', y a finales de la década de 1980, Erik Drexler definió y delimitó dicha ciencia (Molina-Prieto, 2016).

químicamente para que lo logre—, ocupan las porosidades del hormigón y las bloquean, incrementando la resistencia a la compresión, a la tracción y al cizallamiento. Por su parte, las partículas nanométricas de óxido de aluminio (Al_2O_3) añadidas a la mezcla incrementan el módulo de elasticidad del hormigón, hasta en un 143%. Por su parte, el nanosilice (nano- SiO_2) aumenta la resistencia a la tracción, la compresión y la flexión, reduce el tiempo de fraguado y otorga al material endurecido alta resistencia frente a los ataques químicos.

De otro lado, experimentos realizados por Amin y Abu el-Hassan (2015), adicionando nanosilice y nano ferrita a una mezcla de concreto común, en Egipto, demostraron que la adición de estos dos nanomateriales —en proporciones inferiores al 3%²—, generan los siguientes cambios: (i) la resistencia a la compresión se eleva entre el 17% y el 21%; (ii) la resistencia a la tracción aumenta entre el 44% y el 60%; y (iii) la resistencia a la flexión se incrementa entre el 23% y el 25%. Son bastantes los estudios que demuestran que la adición de nanosilice mejora las propiedades mecánicas de hormigones y morteros, puesto que la densidad aumenta mientras la porosidad se reduce, y adicionalmente, se incrementa de manera significativa la adherencia entre el cemento y los agregados (Lin, Chang, Lin, Luo y Tsai, 2008; Sobolev y Gutiérrez, 2005; Senff, Hotza, Repette, Ferreira y Labrincha, 2010).

En cuanto a la durabilidad, cabe decir que el hormigón, debido a su porosidad, permite que el agua ingrese en su interior, lo que a mediano y largo plazo conlleva problemas de corrosión en los componentes metálicos que lo conforman, reduciendo y deteriorando la capacidad estructural de los elementos debilitados por ese fenómeno. A este respecto algunas nanopartículas, por ser diminutas, pueden bloquear las porosidades y por tanto, minimizar la permeabilidad del concreto. El silicato de calcio (CaSiO_3), por ejemplo, ha demostrado alto potencial para desarrollar recubrimientos anticorrosivos y contra-fuego. Otro aspecto relacionado con la durabilidad del concreto es su apariencia. En cuanto a esto, el arquitecto norteamericano Richard Meyer utilizó por primera vez la nanotecnología para lograr la autolimpieza del concreto. En la Iglesia del Jubileo (*Chiesa di Dio Padre Misericordioso*), construida en Roma e inaugurada en 2003, Meyer utilizó 346 bloques de hormigón blanco pretensado, a los que agregó nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2). Seis años después, las observaciones visuales revelaban tan solo ligeras diferencias entre el color blanco de las superficies interiores y las exteriores de los bloques (Pacheco-Torgal y Jalali, 2011).

El incremento de las facultades mecánicas de los concretos modificados con nanomateriales genera importantes ventajas en la arquitectura: (i) menores dimensiones de los elementos estructurales, y por ende, disminución de cargas muertas; (ii) construcciones más livianas, porque se reducen las cantidades de material estructural; (iii) reducción de costos económicos; (iv) disminución del impacto ambiental

² En todos los estudios citados en este artículo, las nanopartículas se adicionaron a la mezcla para reemplazar un cierto porcentaje de cemento, en peso. Por ejemplo, 3%.

durante la producción del cemento y el hierro, porque se requieren menores cantidades; y (v) incremento en la sostenibilidad de los procesos constructivos, porque al reducirse la demanda de materiales para la industria de la construcción (cemento, hierro, piedra, arena y agua), se reduce el impacto que genera la cadena productiva de los dos primeros, y la extracción y consumo de los dos últimos. Por ende, la adición de nanomateriales a los concretos minimiza el impacto que la industria de la construcción genera sobre la salud ambiental y humana a nivel mundial (Azizi Shirkoohi, 2016).

Metodología

El artículo revisa los avances de la nanotecnología en los campos de la arquitectura, la ingeniería civil y la industria de la construcción, haciendo énfasis en los principales nanomateriales que en la actualidad se aplican al concreto para modificar sus propiedades. Se enfocan seis nanomateriales porque son los más utilizados en la industria de la construcción actualmente: Nano-sílice (nano-SiO₂), Nano-dióxido de titanio (nano-TiO₂), Nano-magnetita (nano-Fe₃O₄), Nano-carbonato de calcio (nano-CaCO₃), Nano-trióxido de aluminio (nano-Al₂O₃) y nanotubos de carbón.

Resultados

Nano-sílice: nano-SiO₂

Concretos estructurales. De las nanopartículas que se emplean actualmente en la industria de la construcción, la más usada es la de sílice (cuyo principal componente químico es el dióxido de silicio

SiO₂). Se conoce comercialmente como nanosílice o nanosilica y existe una amplia bibliografía al respecto. La adición de nanosílice al concreto potencializa muchas de sus características convencionales, y además, aporta algunas nuevas. Los hormigones modificados con nanosílice han sido objeto de estudio por innumerables investigadores de diversos países. Said, Zeidan, Bassuoni y Tian (2012) investigaron los efectos de adicionar nanosílice a hormigón simple (cemento ordinario) y a hormigón binario (cemento ordinario + cenizas volcánicas). Dentro de sus conclusiones destacan que la adición de nanosílice: (i) mejora significativamente el rendimiento del concreto; (ii) en todas las edades de curado la resistencia a la compresión se incrementó hasta en un 6%, especialmente a partir de los 28 días; y (iii) la porosidad se redujo, minimizando la penetración de elementos externos que pueden afectar el hormigón. Por su parte, Eskandari et al. (2015), realizaron experimentos adicionando nanosílice al concreto, en proporción del 2%, y micro Zeolita en proporción hasta del 10%, y prepararon las muestras cilíndricas estándar. Los cambios en el comportamiento del concreto modificado con estos aditivos fueron evaluados en edades de 7, 28 y 90 días, mediante scanner de microscopía de barrido electrónico y difracción de rayos X. Las pruebas no revelaron un aumento significativo en las características del concreto en ninguna de las edades, pero sí una disminución considerable en cuanto a la penetración de los agentes que pueden generar corrosión en las estructuras del hormigón armado. En cuanto a la durabilidad del concreto Du, Du y Lui (2014) realizaron

experimentos adicionando nanosílice en proporciones de 0,3% a 0,9%, y observaron que la microestructura del concreto se hizo más homogénea y menos porosa, lo que redujo significativamente la permeabilidad del material e incrementó su durabilidad, porque los canales (poros) que permitían el ingreso de los agentes nocivos, fueron parcialmente rellenos y bloqueados. Después de 28 días, la penetración del agua se redujo en un 56%, en concretos con adición de nanosílice en proporción de 0,3%. Jittabut (2015) estudió el comportamiento térmico y estructural del concreto al adicionarle nanosílice en proporciones inferiores al 5%, utilizando partículas de 12, 50 y 150 nanómetros (nm) de tamaño. El estudio buscó evaluar las modificaciones generadas por estas nanopartículas en concretos con dos destinos funcionales: como acumuladores de energía solar térmica y como aislantes térmicos. No obstante, se evaluaron cinco aspectos principales: resistencia a la compresión, densidad aparente, conductividad térmica, capacidad calorífica y difusividad térmica. Los resultados evidenciaron que: i) la resistencia a la compresión aumenta cuando la adición de nanosílice es inferior al 4%, pero, cuando se supera esta cantidad, el concreto se debilita; ii) la adición de partículas de nanosílice de 50 nm de tamaño en proporción de 4% a 5%, es la más adecuada para disminuir la conductividad térmica del concreto, incrementando así su capacidad como material aislante; y iii) la capacidad para acumular calor fue incrementada significativamente con la adición de nanosílice. Por su parte Belkowitz, Belkowitz, Nawrocki y Fisher (2015) realizaron experimentos adicionando partículas de nanosílice

a concretos tradicionales, en tres dimensiones —5 nm, 16 nm y 46 nm— y se analizaron los resultados tras tiempos de curado cortos y largos. Sus resultados evidencian que las nanopartículas más grandes incrementaron el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión del material, hasta en un 20%. Otros investigadores que han obtenido mejoras en las características estructurales del concreto, agregando nanosílice, son: Kang, Song, Park y Song (2011); Gopinath, Mouli, Murthy, Iyer y Maheswaran (2012); Koohdaragh y Mohamadi (2011); Mahdikhani y Ramezaniyanpour (2014); y Singh, Karade, Bhattacharyya, Yousuf y Ahalawat (2013), entre otros.

Concretos permeables. Una de las tendencias más destacadas de la sostenibilidad urbana actual, es la desimpermeabilización del suelo urbano, porque con ello se contribuye a la recarga de acuíferos y al fortalecimiento del ciclo natural del agua. Para esto, se han generado durante las dos últimas décadas, concretos permeables para la construcción de vías vehiculares, senderos peatonales, ciclo rutas y parqueaderos a cielo abierto (Molina-Prieto, 2015). Los concretos permeables, también llamados concretos porosos, se producen de manera similar a los tradicionales, pero no contienen agregados finos, como la arena, lo que les otorga permeabilidad, pero al mismo tiempo, reduce notablemente su resistencia mecánica. En este sentido algunos investigadores están añadiendo nanosílice a la mezcla, y sus resultados evidencian la obtención de concretos permeables más resistentes a los esfuerzos de tracción y compresión, y con mayor adherencia entre la pasta

de cemento y los agregados (Mohd Ibrahim, Ramadhansyah, Mohd Rosli y Wan Ibrahim, 2016; Mohd Ibrahim, Ramadhansyah, Mohd Rosli, Wan Ibrahim y Fadzli, 2015; Mohd Ibrahim, Ramadhansyah, Mohd Rosli y Mohd Haziman, 2014).

Resistencia eléctrica/absorción del ruido. Otro de los resultados obtenidos por la investigación de Belkowitz et al. (2015) arriba mencionada —en la que se adicionaron partículas nanométricas de sílice de tres tamaños 5 nm, 16 nm y 46 nm al concreto—, fue un incremento muy significativo en la resistencia eléctrica del concreto: un 30% más para las partículas pequeñas, y un 700% (setecientos por ciento), para las más grandes. En cuanto a la absorción del ruido, Gonzalez Safiuddin, Cao y Tighe (2013) realizaron experimentos adicionando nanosílice a concretos destinados a vías vehiculares. Para las pruebas utilizaron partículas de nanosílice con tamaños que oscilaban entre 10 a 20 nm, y en tres distintas proporciones: 0.5%, 1.0% y 1.5%. Sus resultados revelaron que los concretos modificados con nanosílice en proporción de 1,0% y 1.5%, incrementaron de manera significativa la absorción del ruido, en frecuencias que van de los 800 a los 1200 hertzios (Hz).

Morteros de alto rendimiento. En años recientes se han desarrollado nuevos aditivos plastificantes y puzolánicos³ para el hormigón, haciendo posible la producción de

concretos de alto rendimiento (*high performance concrete*-HPC), de ultra-alto rendimiento (*ultra-high performance concrete*-UHPC) y concretos de alta resistencia (*high strength concrete*-HSC). Para la producción de UHPC tres clases de materiales puzolánicos son ampliamente utilizados: humo de sílice, tierra de escoria de alto horno y cenizas volantes (Yu, Spiesz y Brouwers, 2014). Sobre estos materiales de última generación, numerosos investigadores han experimentado adicionando nanosílice. Rong, Sun, Xiao y Jiang (2015) evaluaron las modificaciones que el nanosílice efectuó en morteros UHPC, y sus resultados evidencian que la resistencia a la compresión y a la flexión alcanzó su nivel máximo cuando la adición de nanosílice fue del 3%, pero disminuyó cuando se superó ese porcentaje. Asimismo, detectaron que el diámetro promedio de los poros se redujo, generando una microestructura más densa y homogénea en comparación con las muestras de control. Por su parte, Stefanidou y Papayianni (2012), añadieron nanosílice, en proporciones de 0.5%, 1%, 2% y 5%, a morteros de alta resistencia, consiguiendo reducir significativamente la porosidad del material, e incrementando su resistencia mecánica hasta en un 35%.

Nano-dióxido de titanio: nano-TiO₂

Concretos auto-limpiantes. En la búsqueda de ciudades más sustentables y resilientes, uno de los objetivos de muchos investigadores es la producción de edificaciones y obras civiles de fácil mantenimiento, debido a que reducen el impacto ambiental en cuatro aspectos bien distintos: (i)

³ “Puzolana: Roca volcánica muy desmenuzada, de la misma composición que el basalto, la cual se encuentra en Puzol, población próxima a Nápoles, y en sus cercanías, y sirve para hacer, mezclada con cal, mortero hidráulico” (RAE en línea).

disminuyen los consumos de agua; (ii) minimizan la inversión económica en materiales y equipos de limpieza; (iii) reducen el impacto ambiental que genera la producción de materiales y equipos de limpieza; y (iv) disminuyen la energía y el tiempo del personal de mantenimiento. Las investigaciones en este campo son numerosas, como la de Benedix, Dehn, Quaas y Orgass (2000), que estudia los resultados de la interacción entre el dióxido de titanio (TiO_2) y los materiales de construcción más utilizados en las edificaciones, como los concretos y morteros, porque cuando están recubiertos con nanopartículas de TiO_2 y reciben la luz solar —específicamente la luz ultravioleta—, el polvo, la grasa y la suciedad junto con otros contaminantes, se descomponen rápidamente por un proceso fotocatalítico⁴, y luego, pueden ser fácilmente arrastrados por el agua lluvia; o como la de Shen et al. (2015), donde los investigadores fabricaron un hormigón fotocatalítico con superficie ultra-lisa, gracias a la adición de nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2).

⁴Los concretos y morteros fotocatalíticos han sido profusamente investigados en las últimas dos décadas. La fotocatalisis se logra al enriquecer la mezcla con nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2), o al aplicarlas como recubrimiento sobre el material fraguado y endurecido. Cuando el TiO_2 es expuesto a la radiación ultravioleta (es decir, a la luz del día), absorbe energía de los fotones, y genera modificaciones químicas en la superficie del material (concreto o mortero) y en su entorno inmediato. Gracias a ese proceso fotocatalítico, se logra: reducir la polución del aire urbano, y además, generar concretos auto-limpiantes y auto-desinfectantes (Chen, Kou y Poon, 2012). Varios materiales semiconductores poseen capacidad fotocatalítica: dióxido de titanio (TiO_2), óxido de zinc (ZnO), óxido de hierro (Fe_2O_3), trióxido de wolframio (WO_3) y seleniuro de cadmio (CdSe). Sin embargo, el más utilizado de todos en la industria de la construcción es el TiO_2 , debido a su baja toxicidad y estabilidad química (Pacheco-Torgal y Jalali, 2011).

Concretos purificadores del aire.
En 1999, Murata, Tawara, Obata y Takeuchi publicaron un artículo pionero en el tema de la descontaminación del aire urbano, a partir de concretos enriquecidos o recubiertos con dióxido de titanio (TiO_2), y demostraron que, utilizando este material en vías vehiculares urbanas, se puede capturar y degradar un alto porcentaje del óxido nítrico (N_2O) que producen la industria y los motores de combustión interna en las ciudades. En 2004, Cassar llamó la atención sobre la omnipresencia del concreto en las ciudades contemporáneas, y subrayó que si bien su uso principal es el estructural, se le pueden adicionar otras funciones, como la auto-limpieza y la habilidad de remover partículas contaminantes del aire urbano —como el óxido nítrico (N_2O), el amoníaco y otros aldehídos—, lo que se logra al recubrir las superficies expuestas de concreto, con nanopartículas de TiO_2 . Además, Cassar señaló que el uso combinado de materiales que contengan cemento y TiO_2 , tiene un efecto sinérgico favorable en la reducción de contaminantes del aire. Actualmente es amplia la bibliografía en este campo de investigación (por ejemplo: Agrios y Pichat, 2005; George et al., 2016; Lee, Kim y Lee, 2015; Li, Zhang y Ou, 2006), al igual que las ciudades en las que se ha puesto en práctica este sistema para remover los contaminantes del aire urbano, dentro de las que se destacan Tokio, Milán, Nápoles, París y Copenhague (Ramirez, Demeestere, De Belie, Mäntylä y Levänen 2010; Greco, Ciliberto, Cirino, Capitani y Di Tullio, 2016). Por su parte, Hassan, Dylla, Mohammad y Rupnow (2010), teniendo en cuenta que al recubrir los pavimentos de concreto con

partículas nanométricas de dióxido de titanio (TiO_2), se pueden atrapar y descomponer algunos contaminantes orgánicos e inorgánicos del aire, como el óxido nitroso (N_2O), el dióxido de azufre (SO_2), además de una amplia variedad de compuestos orgánicos volátiles, se dieron a la tarea de evaluar la durabilidad de tal recubrimiento en condiciones de intemperie, y expuesto al desgaste generado por el rodamiento vehicular. Para la valoración utilizaron microscopio electrónico y espectroscopía de dispersión de energía, y concluyeron que el recubrimiento de concretos con TiO_2 proporciona una durabilidad aceptable y buena resistencia al desgaste. En el mismo sentido, Li et al. (2006) valoraron la resistencia a la abrasión en concretos para pavimentos vehiculares, enriquecidos con nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) y de nanosilíce (SiO_2), en proporciones inferiores al 3%; y concluyeron que: (i) la resistencia a la abrasión es superior en los concretos modificados con TiO_2 que con SiO_2 ; (ii) la resistencia a la abrasión aumenta en relación directa con la resistencia a la compresión; y (iii) la resistencia a la abrasión disminuye cuando el porcentaje de nanopartículas se incrementa por encima del 3%.

Nano-magnetita: nano- Fe_3O_4

Las pruebas realizadas por Sikora, Horszczaruk, Cendrowski y Mijowska (2016) evidenciaron que la adición de nano-magnetita (Fe_3O_4) a los concretos no influye en la consistencia ni en la fluidez de la mezcla. Tampoco modifica la usual liberación de calor que ocurre durante las primeras 72 horas de endurecimiento, ni los niveles de hidratación que se requieren durante los primeros 28 días de curado

—a diferencia de otras nanopartículas más utilizadas en la tecnología del hormigón, como el nanosilíce (SiO_2) o el nano-dióxido de titanio (TiO_2)—, que requieren mayor cantidad de agua durante los procesos de mezcla, endurecimiento y curado. En cuanto a la resistencia a la compresión, Sikora et al. encontraron que se incrementa significativamente, debido a que las nanopartículas de Fe_3O_4 llenan las porosidades del concreto y le aportan mayor densidad, al tiempo que incrementan la adherencia entre el cemento y los agregados. Subrayan que la adición de Fe_3O_4 resulta óptima en proporción del 3%, pero si este porcentaje se aumenta o disminuye, aunque sea en un 1%, se reduce notablemente la capacidad estructural del material. Este resultado corrobora los hallazgos previos de Yasdi, Arefi, Mollaahmadi y Nejand (2011), así como los de Amin, El-Gamal y Hashem (2013). De otro lado, Portella Bragança (2014) realizó experimentos adicionando nano- Fe_3O_4 a concretos en proporción del 1%, y concluyó que este nanomaterial mejora las propiedades mecánicas y físico-químicas del hormigón y minimiza los procesos de corrosión de las armaduras, posibilitando el desarrollo de materiales estructurales para la industria de la construcción, más durables y resistentes.

Nano-carbonato de calcio: nano- CaCO_3

Ge, Wang, Sun, Huang y Hu (2014) realizaron pruebas adicionando nano-carbonato de calcio (nano- CaCO_3) a concretos y morteros. Las pruebas de resistencia a la compresión las realizaron en edades de 7 y 28 días para los concretos, y de 7 días para los morteros. Sus resultados

evidencian que, tanto el concreto como el mortero, incrementan la resistencia a la compresión cuando la adición de nano- CaCO_3 es menor o igual al 2,5%. Además, reportan la disminución significativa del tamaño de los poros para los dos materiales, lo que reduce la permeabilidad, y en consecuencia, la oxidación de las armaduras metálicas. Investigaciones similares, como la de Shaikh y Supit (2014), difieren en lo concerniente al porcentaje óptimo de nano- CaCO_3 , puesto que sus resultados evidencian que, la resistencia a la compresión en todas las edades del concreto se incrementa hasta en un 146-148%, cuando se añade nano- CaCO_3 en proporción máxima del 1%. Por su parte, Camiletti, Nehdi y Soliman (2013) investigaron los efectos de la adición de nano- CaCO_3 sobre las propiedades de concretos de ultra-alto rendimiento (*ultra-high performance concrete-UHPC*), añadiendo nano- CaCO_3 en proporciones de 2,5%, 5%, 10% y 15%. Sus resultados demuestran que la adición de este nanomaterial acelera el proceso de endurecimiento y curado, reduce los riesgos de corrosión de las estructuras metálicas y genera un hormigón más amigable con el ambiente, porque al incrementarse la resistencia física del concreto se reducen las dimensiones de los elementos estructurales y, por ende, se minimizan las demandas de cemento, hierro, arena, piedra y agua. En lo relativo a la proporción óptima de nano- CaCO_3 recomiendan adicionarlo en proporciones que van del 5% al 10%.

Nano-trióxido de aluminio: nano- Al_2O_3

Li, Wang, He, Lu y Wang (2006) realizaron pruebas adicionando nano-

trióxido de aluminio (nano- Al_2O_3) a morteros de cemento, con diferentes tiempos de curado: 3, 7 y 28 días. Encontraron que, adicionando las nanopartículas en proporción del 7%, la resistencia a la compresión aumenta un 30%, a los 7 días. En cuanto al módulo de elasticidad, señalan que cuando la adición de nano- Al_2O_3 fue del 5%, el módulo de elasticidad de los morteros alcanzó su máximo y fue de 154%, 241% y 243%, a la edad de 3, 7 y 28 días, respectivamente. Por su parte, Arefi, Javeri y Mollaahmadi (2011) resaltan que la adición de nano- Al_2O_3 a morteros de cemento reduce su porosidad, incrementa su densidad y potencializa sus propiedades mecánicas, cuando se agrega en proporciones de 1% hasta 3%, pero si esta proporción se supera, las propiedades mecánicas del material se reducen gravemente. En una investigación similar, pero realizada sobre concretos, Nazari, Riahi, Riahi, Shamekhi y Khademno (2010), destacan el incremento de la resistencia final del concreto a los distintos esfuerzos, cuando se adiciona nano- Al_2O_3 en proporción inferior al 2%, siendo óptimo agregar solamente un 1%.

Nanotubos de carbón⁵

Shang y Song (2017) aseguran que los nanotubos de carbón

⁵ “Los nanotubos de carbono (NTC’s) fueron descubiertos en 1991 por Sumio Iijima, quien trabajando en un microscopio electrónico, observó la existencia de moléculas tubulares en el hollín formado a partir de las descargas de arco eléctrico, empleando grafito. Precursor de los NTC’s es el fullereno. Los fullerenos son una forma alotrópica del carbono. Fueron descubiertos accidentalmente por los grupos de Smalley y Kroto en 1985, siendo galardonado su descubrimiento con el premio Nobel de química en 1996” (Mauert, Soto, León y Flores, 2009, p. 22).

serán tendencia en la industria de la construcción, debido a que aportan al concreto una capacidad de resistencia supremamente alta. Llegaron a esta conclusión después de realizar experimentos reforzando el hormigón con nanotubos de carbón, en porcentajes de 0,0%, 0,05%, 0,01%, 0,15%, 0,2% y 0,25% en peso, con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas. Concluyeron que la mejor cantidad de nanotubos para mejorar las características estructurales del concreto es el 0,22%, pues con este porcentaje se incrementó en un 30% la resistencia a compresión, y en un 46% la resistencia a la rotura por agrietamiento, en comparación a los concretos convencionales. Lu, Ouyang y Xu (2016), para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón de alta durabilidad (UHSC), le agregaron nanotubos de carbón de múltiples paredes (MWCNTs). En los experimentos el UHSC se mezcló con varios porcentajes de MWCNTs, variando de 0% a 0,15% en relación con el peso del cemento. Concluyeron que el porcentaje de MWCNTs más apropiado para mejorar las propiedades del concreto es el 0,05%, porque incrementó en un 4,63% la resistencia a la compresión, mejoró la resistencia a la flexión y la capacidad de deformación. Para observar la dispersión de MWCNTs en el cemento se utilizó microscopía electrónica de barrido de emisión de campo; se observó que los MWCNT estaban bien dispersos en la matriz y no se detectaron aglomeraciones en el cemento.

Por su parte, Arani y Kolahchi (2016) realizaron pruebas armando columnas rectas de hormigón con nanotubos de carbón —los estudios se efectuaron

con un aumento del volumen porcentual de nanotubos de carbón con paredes simples—, y pudieron observar que las estructuras se volvían más rígidas, y en consecuencia, se hacían más resistentes a las deformaciones y a los esfuerzos de pandeo, con respecto a columnas de hormigón armado con acero. Por su parte, Kharissova, Torres Martínez y Kharisov (2016) señalan que al adicionar nanotubos de carbón (CNT) y nanofibras de carbón (CNF) al cemento, se forman nanocompuestos que conducen a una considerable mejoría de las características del hormigón, dado que los CNTs pueden actuar como puentes eficaces para reducir y limitar la propagación de microfisuras: Sin embargo, los CNTs deben estar bien distribuidos dentro del material para que proporcionen una buena unión entre ellos y la matriz del cemento hidratado. Sus resultados evidencian que con el aumento del porcentaje de CNTs aumenta la carga de pandeo no lineal, haciendo más rígida la estructura.

Conclusiones

Actualmente se requieren grandes volúmenes de concreto y mortero de cemento para la industria de la construcción. Esta necesidad —que se registra a nivel global— exige la producción de miles de toneladas de cemento, además de la extracción de enormes cantidades de agregados áridos para la producción del hormigón, como la arena y la gravilla. Dichos procesos impactan negativamente sobre los ecosistemas y la biodiversidad, al tiempo que generan altas cantidades de gases de efecto invernadero. En este contexto surgen los nanomateriales que, al reemplazar en bajos porcentajes al cemento requerido para la

producción de concretos y morteros, alteran las propiedades mecánicas y fisicoquímicas del material final. Los nanomateriales analizados en el artículo modifican las facultades de concretos y morteros, de muy diversas maneras: se incrementa el módulo de elasticidad, la resistencia a la compresión, a la tracción, a la flexión y al cizallamiento; se mejora significativamente la absorción del ruido, la resistencia eléctrica y la adherencia entre el cemento y los agregados; se reduce la porosidad y, por ende, el ataque de agentes externos; se magnifica la capacidad para acumular calor; se disminuye la conductividad térmica y, en consecuencia, se mejora la capacidad como aislante térmico; se logran concretos autolimpiantes, contrafuego y purificadores del aire; se mejora la fluidez y la plasticidad de la mezcla durante el proceso de fundición; se reduce el tiempo

de fraguado y se otorga al material endurecido alta resistencia frente a los ataques químicos; se fortalece la resistencia mecánica de los concretos permeables; se acelera el proceso de endurecimiento y curado y se minimizan los fenómenos de corrosión de las armaduras metálicas.

Aparte de lo anterior, cabe subrayar que la adición de nanomateriales a concretos y morteros, genera materiales de construcción más amigables con el ambiente, porque al incrementarse la resistencia física del concreto se reducen las dimensiones de los elementos estructurales; por ende, se minimizan las demandas de cemento, hierro, arena, piedra y agua a nivel local y global. Es prioritario que arquitectos e ingenieros vinculados a la industria de la construcción, empiecen a integrar los nanomateriales durante la producción de las mezclas a base de cemento.

Referencias

Agrios, A. G. & Pichat, P. (2005). State of the art and perspectives on materials and applications of photocatalysis over TiO_2 . *Journal of Applied Electrochemistry*, 35(7), 655-663.

Amin, M. & Abu el-Hassan, K. (2015). Effect of using different types of nano materials on mechanical properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 80, 116-124.

94 Amin, M. S., El-Gamal, S. M. A. & Hashem, F. S. (2013). Effect of addition of nano-magnetite on the hydration characteristics of hardened Portland cement and high slag cement pastes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 112(3), 1253–1259.

Arani, A. J. & Kolahchi, R. (2016). Buckling analysis of embedded concrete columns armed with carbon nanotubes. *Computers and Concrete*, 17(5), 567-578.

Arefi, M. R., Javeri, M. R. & Mollaahmadi, E. (2011). To study the effect of adding Al_2O_3 nanoparticles on the mechanical properties and microstructure of cement mortar. *Life Science Journal*, 8(4), 613-617.

Azizi Shirkoohi, Z. (2016). Application of Nanotechnology in the Concrete Industry Improve the Performance of Sustainable Buildings. *International Academic Journal of Science and Engineering*, 3(3), 89-97.

Balaguru, P. & Chong, K. (2006). Nanotechnology and concrete: research opportunities. Proceedings of the *ACI Session on Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives*, November 7, 2006, Denver, USA.

Belkowitz, J. S., Belkowitz, W. B., Nawrocki, K. & Fisher, F. T. (2015). Impact of Nanosilica Size and Surface Area on Concrete Properties. *ACI Materials Journal*, 112(3), 419-428.

Benedix, R., Dehn, F., Quaas, J. & Orgass, M. (2000). Application of titanium dioxide photocatalysis to create self-cleaning building materials. *Lacer*, 5, 157-168.

Camiletti, J., Nehdi, M. L. & Soliman, A. M. (2013). Effect of nano-calcium carbonate on early-age properties of ultrahigh-performance concrete. *Magazine of Concrete Research*, 65(5), 297–307.

Cassar, L. (2004). Photocatalysis of cementitious materials: clean buildings and clean air. *MRS Bulletin*, 29(5), 328-331.

Chen, J., Kou, S. C. & Poon, C. S. (2012). Hydration and properties of nano- TiO_2 blended cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 34, 642-649.

Du, H., Du, S. & Liu, X. (2014). Durability performances of concrete with nano-silica. *Construction and Building Materials*, 73, 705-712.

Eskandari, H., Vaghefi, M. & Kowsari, K. (2015). Investigation of Mechanical and Durability Properties of Concrete Influenced by Hybrid Nano Silica and Micro Zeolite. *Procedia Materials Science*, 11, 594-599.

Ge, Z., Wang, K., Sun, R., Huang, D. & Hu, Y. (2014). Properties of self-consolidating concrete containing nano-CaCO₃. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 3(3-4), 191-200.

George, C., Beeldens, A., Barmpas, F., Doussin, J. F., Manganelli, G., Herrmann, H...& Mellouki, A. (2016). Impact of photocatalytic remediation of pollutants on urban air quality. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 10(5), 1-11.

Gonzalez, M., Safiuddin, M., Cao, J. & Tighe, S. (2013). Sound Absorption and Friction Responses of Nanoconcrete for Rigid Pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2369), 87-94.

Gopinath, S., Mouli, P. C., Murthy, A. R., Iyer, N. R. & Maheswaran, S. (2012). Effect of nano silica on mechanical properties and durability of normal strength concrete. *Archives of Civil Engineering*, 58(4), 433-444.

Greco, E., Ciliberto, E., Cirino, A. M., Capitani, D. & Di Tullio, V. (2016). A new preparation of doped photocatalytic TiO₂ anatase nanoparticles: a preliminary study for the removal of pollutants in confined museum areas. *Applied Physics A*, 122(530), 1-6.

Hassan, M. M., Dylla, H., Mohammad, L. N. & Rupnow, T. (2010). Evaluation of the durability of titanium dioxide photocatalyst coating for concrete pavement. *Construction and building materials*, 24(8), 1456-1461.

Jafarbeglou, M., Abdouss, M. & Ramezaniapour, A. A. (2015). Nanoscience and Nano Engineering in Concrete Advances, a Review. *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 11(4), 263-273.

Jittabut, P. (2015). Effect of Nanosilica on Mechanical and Thermal Properties of Cement Composites for Thermal Energy Storage Materials. *Energy Procedia*, 79, 10-17.

Kang, H. J., Song, M. S., Park, J. H. & Song, S. J. (2011). Influence of Nano Silica Dispersant on Hydration Properties of Cementitious Materials. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 48(6), 510-515.

Koohdaragh, M. & Mohamadi, H. H. (2011). Comparison of mechanical of the concrete samples containing micro-silica and nano-silica. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(10), 560-563.

Kharissova, O. V., Torres Martínez, L. & Kharisov, B. I. (2016). "Recent Trends of Reinforcement of Cement with Carbon Nanotubes and Fibers". En: *Advances in Carbon Nanostructures*, ed. Prof. AMT da Silva, INTECH.

Larrea, P. & Domínguez, S. (2011). *Hormigón simple utilizando agregado volcánico de las islas Galápagos "San Cristóbal"*. Tesis. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Lee, J. H., Kim, Y. K. & Lee, S. W. (2015). Experimental Study on the Long-term Performance of TiO₂ Concrete for Road Structures. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 35(3), 691-698.

Li, H., Zhang, M. H. & Ou, J. P. (2006). Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement. *Wear*, 260, 1262-1266.

96 Li, Z., Wang, H., He, S., Lu, Y. & Wang, M. (2006). Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite. *Materials Letters*, 60(3), 356-359.

Liu, J., Li, Q. & Xu, S. (2015). Influence of nanoparticles on fluidity and mechanical properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 101, 892-901.

Lin, K. L., Chang, W. C., Lin, D. F., Luo, H. L. & Tsai, M. C. (2008). Effects of nano-SiO₂ and different ash particle sizes on sludge ash–cement mortar. *Journal of Environmental Management*, 88(4), 708-714.

Lu, L., Ouyang, D. & Xu, W. (2016). Mechanical properties and durability of ultrahigh strength concrete incorporating multi-walled carbon nanotubes. *Materials*, 9(6), 419-430.

Mahdikhani, M. & Ramezani pour, A. A. (2014). Mechanical properties and durability of self consolidating cementitious materials incorporating nano silica and silica fume. *Computers and Concrete*, 14(2), 175-191.

Maubert, M., Soto, L., León, A. M. & Flores, J. (2009). Nanoturbo de carbono: La era de la nanotecnología. *Razón y palabra*, 68, 17-27.

Mohd Ibrahim, M. Y., Ramadhansyah, P. J., Mohd Rosli, H. & Wan Ibrahim, M. H. (2016). A review of microstructure properties of porous concrete pavement incorporating nano silica. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(20), 11832-11835.

Mohd Ibrahim, M. Y., Ramadhansyah, P. J., Mohd Rosli, H., Wan Ibrahim, M. H. & Fadzli, M. N. (2015). Utilization of Nano Silica as Cement Paste in Mortar and Porous Concrete Pavement. *In Advanced Materials Research*, 1113, 135-139.

Mohd Ibrahim, M. Y., Ramadhansyah, P. J., Mohd Rosli, H. & Mohd Haziman, W. I. (2014). An Overview on the Performance of Nano Silica Materials on the Properties of Porous Concrete Pavement. *Advanced Review on Scientific Research*, 1(1), 34-42.

Molina-Prieto, L. F. (2016). Nanotecnología: herramienta inteligente para la

conservación del patrimonio arquitectónico y urbano. *Revista de investigación*, 9(1), 7-22.

Molina-Prieto, L. F. (2015). Urban storm water resource management: strategies, policies and urban regulations in five European countries. *Revista de investigación*, 8(1), 125-138.

Murata, Y., Tawara, H., Obata, H. & Takeuchi, K. (1999). Air purifying pavement: development of photocatalytic concrete blocks. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 4(2), 227-230.

Nazari, A., Riahi, S., Riahi, S., Shamekhi, S. F. & Khademno, A. (2010). Influence of Al₂O₃ nanoparticles on the compressive strength and workability of blended concrete. *Journal of American Science*, 6(5), 6-9.

Pacheco-Torgal, F. & Jalali, S. (2011). Nanotechnology: advantages and drawbacks in the field of construction and building materials. *Construction and Building Materials*, 25(2), 582-590.

Portella Bragança, M. D. (2014). *Avaliação e monitoramento dos mecanismos de deterioração do concreto exposto aos íons cloreto e sulfato e o efeito da adição de Nano-Fe₃O₄ por espectroscopia de impedância eletroquímica*. Tese Doutoral, Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia-PIPE.

Quercia, G. & Brouwers, H. J. H. (2010). Application of nano-silica (nS) in concrete mixtures. In *8th fib International Ph. D. Symposium in Civil Engineering. Lyngby* (pp. 431-436).

Ramirez, A. M., Demeestere, K., De Belie, N., Mäntylä, T. & Levänen, E. (2010). Titanium dioxide coated cementitious materials for air purifying purposes: preparation, characterization and toluene removal potential. *Building and Environment*, 45, 832-838.

Rong, Z., Sun, W., Xiao, H. & Jiang, G. (2015). Effects of nano-SiO₂ particles on the mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 56, 25-31.

Safiuddin, M., Gonzalez, M., Cao, J. & Tighe, S. L. (2014). State-of-the-art report on use of nano-materials in concrete. *International Journal of Pavement Engineering*, 15(10), 940-949.

Said, A. M., Zeidan, M. S., Bassuoni, M. T. & Tian, Y. (2012). Properties of concrete incorporating nano-silica. *Construction and Building Materials*, 36, 838-844.

Sanchez, F. & Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete—a review. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2060-2071.

Senff, L., Hotza, D., Repette, W. L., Ferreira, V. M. & Labrincha, J. A. (2010). Mortars with nano-SiO₂ and micro-SiO₂ investigated by experimental design. *Construction and Building Materials*, 24(8), 1432-1437.

Shaikh, F. U. & Supit, S. W. (2014). Mechanical and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concrete containing calcium carbonate (CaCO₃) nanoparticles. *Construction and Building Materials*, 70, 309-321.

Shang, S. S. & Song, X. B. (2017). Experimental Research on Mechanical Performance of Carbon Nanotubes Reinforced Concrete. *Applied Mechanics and Materials*, 858, 173-178.

Shen, W., Zhang, C., Li, Q., Zhang, W., Cao, L. & Ye, J. (2015). Preparation of titanium dioxide nano particle modified photocatalytic self-cleaning concrete. *Journal of Cleaner Production*, 87, 762-765.

Sikora, P., Horszczaruk, E., Cendrowski, K. & Mijowska, E. (2016). The Influence of nano-Fe₃O₄ on the microstructure and mechanical properties of cementitious composites. *Nanoscale Research Letters*, 11(182), 1-9.

Singh, L. P., Karade, S. R., Bhattacharyya, S. K., Yousuf, M. M. & Ahalawat, S. (2013). Beneficial role of nanosilica in cement based materials—A review. *Construction and Building Materials*, 47, 1069-1077.

Sobolev, K. & Gutiérrez, M. F. (2005). How nanotechnology can change the concrete world. *American Ceramic Society Bulletin*, 84(10), 14-18.

Stefanidou, M. & Papayianni, I. (2012). Influence of nano-SiO₂ on the Portland cement pastes. *Composites Part B: Engineering*, 43(6), 2706-2710.

Yazdi, N.A., Arefi, M.R., Mollaahmadi, E. & Nejand, B.A. (2011). To study the effect of adding Fe₂O₃ nanoparticles on the morphology properties and microstructure of cement mortar. *Life Science Journal*, 8(4), 550–554.

Yousef Mohamed, A. S. (2015). *Nano-innovation in construction, a new era of sustainability*. International Conference on Environment and Civil Engineering (ICEACE'2015) April 24-25, 2015, Pattaya (Thailand).

Yu, R., Spiesz, P. & Brouwers, H. J. H. (2014). Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount. *Construction and Building Materials*, 65, 140-150.