

Uso De Nanomateriales En La Producción Del Concreto: Revisión Literaria

Use of Nanomaterials in Concrete Production: Literary Review

Sócrates Muñoz ^{1,2}  orcid.org/0000-0001-6001-1009

Yomira Tuse ¹  orcid.org/0000-0002-2400-3703

Kevin Guerrero ¹  orcid.org/0000-0002-0511-5523

Yerson Vásquez ¹  orcid.org/0000-0003-3182-8735

Jhon Ayala ¹  orcid.org/0000-0001-7191-3577

¹ Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú.

² Director de la Escuela Profesional de ingeniería civil, Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú.

Correo electrónico del autor principal: msocrates@crece.uss.edu.pe

Resumen

Este artículo presenta una revisión del implemento de nanomateriales para la producción de concreto. Se revisaron 79 artículos indexados entre los años 2010 al 2021 los cuales se distribuyen de la siguiente manera: 54 artículos son de Scopus, 3 de Scielo, 4 de ScienceDirect y 3 de IOP Science, 3 Dialnet y 12 de ResearchGate, sobre la influencia de los nanomateriales como la nano-sílice, los nanotubos de carbono, el nano-titanio y el nano-óxido férrico que tiene sobre la producción del concreto, se estima que en el mercado se comercializan más de 2000 nano-productos. El objetivo del presente documento es realizar una revisión sistemática del uso de nanomateriales empleados para la producción de concreto, que son beneficiosos y útiles en tiempos modernos generando productividad en el sector de la construcción debido a la producción de un concreto radicalmente nuevo con mejoras en sus propiedades de resistencia a la compresión, flexión y durabilidad haciendo del concreto un material ambientalmente sostenible. Se concluye que el uso de nanomateriales mejora las propiedades del concreto fresco y endurecido, pero su exceso afecta la resistencia mecánica y trabajabilidad, dando lugar a nuevas investigaciones relacionadas al uso de nanomateriales en la producción del concreto.

Palabras clave: Cemento, Concreto, Nanomateriales, Nanotecnología.

Abstract

This article presents a review of the implement of nanomaterials for the production of concrete. Seventy-nine articles indexed between the years 2010 to 2021 were reviewed and are distributed as follows: 54 articles are from Scopus, 3 from Scielo, 4 from ScienceDirect and 3 from IOP Science, 3 Dialnet and 12 from ResearchGate, on the influence of nanomaterials such as nano-silica, carbon nanotubes, nano-titanium and nano-ferric oxide that have on the production of concrete, it is estimated that more than 2000 nano-products are marketed on the market. The objective of this document is to carry out a systematic review of the use of nanomaterials used for the production of concrete, which are beneficial and useful in modern times generating productivity in the

construction sector due to the production of radically new concrete with improvements in its properties of resistance to compression, bending and durability making concrete an environmentally sustainable material. It is concluded that the use of nanomaterials improves the properties of fresh and hardened concrete, but its excess affects the mechanical resistance and workability, giving rise to new research related to the use of nanomaterials in the production of concrete.

Key-words: Cement, Concrete, Nanomaterials, Nanotechnology.

1 Introducción

El concreto es muy beneficioso en cuanto a su función que cumple, lo cual es una alternativa de vital importancia en la construcción de obras de infraestructura y, por tanto, es un material muy usado en la industria de la construcción. Para la producción del concreto se tiene como principal insumo al cemento, que debido a la alta demanda del concreto exige un mayor consumo de cemento, obligando a la industria cementera a consumir mucha energía y emitir grandes cantidades de CO₂ y gases del efecto invernadero, es por ello que se propone reemplazar de manera parcial el cemento con los nanomateriales que puede modificar la estructura atómica de manera favorable, mejorando las propiedades físicas y mecánicas del concreto en estado fresco y endurecido generando un concreto radicalmente nuevo.

Los nanomateriales han progresado con más auge en la década de los 80, con una variedad de productos tanto en la industria de la construcción, metalurgia e industria textil entre otros [1], generando un avance revolucionario respecto a la ciencia, ofreciendo un amplio avance en muchas áreas científicas por su característica única en su tamaño que varía de 1 a 100 nm [2].

Los nanomateriales actualmente son un gran aporte a la ciencia de los materiales, tanto para el cemento y el concreto donde sus propiedades pueden mejorarse y modificarse [3], generado grandes saltos en el uso de nanomateriales, esperando que se normalice el uso de estos hasta que llegue a ser económicos y de uso cotidiano [4]; donde hoy en día el avance en la nanociencia y la nanotecnología han creado una nueva aplicación de materiales, que varía en su composición del material original, pero que generan en los materiales características y propiedades únicas [5].

Los nanomateriales son una tecnología que puede resultar beneficioso por ende investigaciones buscan formas de garantizar la larga vida en el concreto mejorando sus propiedades físicas y químicas

destacando su resistencia, permeabilidad, ductilidad, retracción y resistencia al impacto [6, 7]. Es importante disminuir la producción del cemento a nivel mundial para no seguir ocasionando impactos negativos al medio ambiente ya que esto conlleva a una destrucción de los ecosistemas del planeta poniendo en peligro la propia existencia de las personas. Por tal motivo el empleo de la nanotecnología es importante porque ayuda a manipular las propiedades mecánicas del concreto a una escala nanométrica o atómica, a esta escala las propiedades de las partículas cambian significativamente respecto a las mayores y se puede manipular las propiedades con mayor facilidad.

Las nanopartículas son complementos microestructurales efectivos para la composición de cemento que al agregarlos cambian sus propiedades [8], y ofrecen muchas ventajas en su aplicación con mayor impacto en la industria de la construcción que cualquier otro sector [9]; además que tienen un gran aporte en el mercado y en la economía por su crecimiento en el campo de la ciencia e ingeniería [10], debido a esta implementación en el sector construcción esto permite el diseño y creación de nuevos diseños arquitectónicos que generan edificios inteligentes con un gran porcentaje de ahorro económico [11]. Los nanomateriales son materiales de última generación que permite la reducción significativa de una cantidad de cemento y de esta manera elaborar concretos más económicos por metro cúbico y al mismo tiempo reducir la demanda del cemento mitigando impactos ambientales negativos en la producción del cemento aportando un desarrollo sostenible en el sector de la construcción.

Por eso, el uso de los nanomateriales en la producción de concretos de alto rendimiento ha logrado crecer constantemente en el campo de la construcción, donde se requiere una mejora en la tecnología del empleo de los nanomateriales para lograr alcanzar un perfeccionamiento en el concreto de gran rendimiento [12].

Por ello, resulta uno de los materiales más utilizados en el mundo. Así pues, existen varias investigaciones agrupadas en reciclaje, nuevos materiales, entre otros. A todo esto, se adiciona que el uso de los nanomateriales implica el manejo de materiales con medidas inferiores de 100 nm [13].

El concreto es un material muy usado en la ingeniería estructural por su resistencia, costo y su abundante materia prima además de un alto rendimiento y versatilidad en obra. Por ello, la aplicación de nanoaditivos se han usado con mucho éxito en la construcción por su excelente aporte en la resistencia a la tracción, flexión entre otros del concreto [14, 15]. Además, la demanda de materiales en el concreto es mayor que antes. Por ello, el empleo de nanomateriales puede obtener mejoras en las propiedades del concreto [16], porque en los resultados experimentales destacan por presentar beneficios equilibrados de diversas propiedades de la ingeniería del concreto, porque logra identificar los niveles estimados de sistemas de refuerzo a micro y nanoescala [17]. Los nanomateriales ayudan en la manufactura del concreto a escalas nanométricas, mejorando el proceso de hidratación del cemento, influyen como plastificantes aumentando la trabajabilidad, la absorción actuando como reductores de agua haciendo casi nula la permeabilidad y de esta manera la durabilidad y la resistencia mecánica aumentarían reduciendo los costos de mantenimiento que tendría una estructura en su etapa de operación. Los ejemplos de nanomateriales incluyen nanotubos de carbono (CNT), óxido nanoférrico (nano - Fe_2O_3), nano sílice (nano- SiO_2) y óxido de grafeno. Los nanomateriales se pueden agregar al cemento con la adición de otros refuerzos como vidrio, fibras de acero, cenizas volantes y polvo de cáscara de arroz [18].

2 Metodología

La metodología utilizada durante el proceso de desarrollo del artículo se focalizó en literatura influyente en torno al tema de estudio considerando los pasos de recopilación de datos, pre procesamiento y análisis de información; donde implicó seleccionar publicaciones más relevantes entre 2010 y 2021; se filtraron términos de búsqueda en bases de datos Scopus, Scielo, ScienceDirect, IOP Science, Dialnet y ResearchGate; en función del objetivo del trabajo; para mayor detalle en la tabla 1 se muestra la distribución de los artículos citados según base de datos y año de publicación.

Año de Publicación	Bases de Datos					Total	
	Scopus	Scielo	Science Direct	Researchgate	IOP Science		Dialne
2010	3					3	
2011	1		1	1		3	
2012	3		1			4	
2013	2		1	1	1	1	6
2014	2			2			4
2015	5	1		2			8
2016	5		1	3			9
2017	5			2		1	8
2018	5	1		1	1		8
2019	8	1					9
2020	8				1	1	1
2021	7						7
Total	54	3	4	12	3	3	79

TABLA 1: DISTRIBUCIÓN DE LOS ARTÍCULOS CITADOS SEGÚN BASE DE DATOS Y AÑO DE PUBLICACIÓN

3 Casos De Estudios Realizados Con Nanomateriales

Nano-Titanio (nano- TiO_2).

Se estudió el nano- TiO_2 para buscar la causa y efecto en el concreto buscando sustituir de manera parcial el cemento al 1%, usado para mejorar la durabilidad, donde se obtiene aumento en el porcentaje óptimo del 5.90% del peso del cemento a los 28 días [19, 20].

Esta incorporación es una de más utilizada en pinturas, pero también se puede adicionar como material de relleno en el concreto como en huecos, cangrejeras, fisuras, entre otros. La sustitución parcial del cemento por el dióxido de nanotitanio (TiO_2) en un rango de 0.5 a 2 %, pero con un 1 % del peso de cemento su resistencia a la compresión aumenta en un 8 %, a diferencia del concreto convencional. [21].

Se ha demostrado que cuando se usa el dióxido de nanotitanio (TiO_2) como pintura o recubrimiento superficial en el concreto mejora la resistencia a la compresión. Pero al ser usado como aditivo presenta una menor resistencia que un concreto sin este nanomaterial [22]. El uso del nano- TiO_2 en la incorporación de la fabricación del concreto ayuda en la captura del CO_2 que va depender del tiempo de

exposición que se tenga y de la relación del agua/cemento, producto de esta exposición se origina el hidróxido de calcio (CH) que tiene un comportamiento contrario al CO₂ ante el medio ambiente.

El nano-TiO₂, con mayor uso en pavimentos rígidos, evidenciando aumento de resistencia de 12%, 22.71% y 27% en los días 7, 28 y 120 pero esto genera una reducción de porosidad y llenar estos para generar un aumento significativo en la resistencia a la compresión [23, 24]. Al usar el nano-TiO₂ en el concreto para la construcción de pavimentos rígidos ayuda en el proceso de la fotocatalisis contribuyendo a limpiar el aire del CO₂ producido por los automóviles que circula en una ciudad, convirtiéndola en una isla fotocatalítica y de esta manera ayudar al proceso natural de la fotosíntesis que es una actividad necesaria para la vida de la humanidad disminuyendo enfermedades del aparato respiratorio, cardiovasculares, degenerativas, ansiedad y estrés, y de esta manera se promueve un equilibrio sustentable entre la naturaleza y la tecnología.

Para el cual el uso del 1.5% del peso de cemento, con partículas de agregados de 4.75mm y material fino de 19mm, se obtuvo, de la muestra del concreto tradicional, una resistencia a la compresión de 92.3 MPa y para Nano-TiO₂ de 113.3 MPa. Pero su absorción de agua fue mucho menor que un concreto tradicional donde se tiene un 0.5% de absorción de agua y para Nano-TiO₂ tiene un 0.135% [25].

Nano - Óxido Férrico (nano-Fe₂O₃)

Se ha estudiado la adición de nano-Fe₂O₃ mejora la resistencia a la flexión, compresión y tracción. Estos estudios evidenciaron que solo con un 4% de su peso se obtiene una mejora en su resistencia y absorción al agua en la pasta de cemento. Esta nanopartícula puede ser capaz de formar un gel que dará una mayor cantidad de Ca (OH)₂ en la etapa primaria de la hidratación y conlleva a un aumento de resistencia. Adicionalmente, el nano-Fe₂O₃ también puede funcionar como nano-rellenadores para disminuir la cantidad de poros y reducir la permeabilidad del agua [23]. Esta observación se atribuyó a la formación de gel de hidrato férrico cálcico en la microestructura, lo que condujo a la formación de una microestructura homogénea con tamaños de poros más pequeños y, en consecuencia, a una menor permeabilidad contra la penetración de iones agresivos de cloruro.

En el caso del Nano-Fe₂O₃ en morteros, se establecen dosificaciones del 1%, 3% y 5% del peso del cemento y ver su comportamiento al llegar a su

máxima resistencia a los 28 días, donde su mayor resistencia a la compresión fue de 36 MPa a los 28 días con un 3% del Nano-Fe₂O₃; pero también hay investigaciones que demuestran que con una dosificación de 1% del peso del cemento el nano-Fe₂O₃ se puede generar mayor capacidad de absorción para formar productos de hidratación esférica y en fases monofásicas (AFm) o trifásicas (AFt) [26, 27].

Una gran innovación de este nanomaterial resulta el autodiagnóstico de tensión y estudio de las fuerzas de tracción y flexión que pueden mostrar la salud estructural del concreto en tiempo real, sin presencia de sensores en la construcción de estructuras inteligentes, que con un 2% del volumen del cemento se muestra un aumento considerable en la resistencia a la flexión y resistencia a la tracción [28].

Nano - Sílice (nano-SiO₂)

Se investigó los efectos del nano-SiO₂ en las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto que contiene fibras de polipropileno. Además, se incorporó fibras de polipropileno en porcentajes de 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 en volumen y 3% de nano-sílice, con una relación de agua-cemento de 0.50 a 0.33 donde resistencia a la compresión mejora en 27.92%, 33.04% y 31.88% a los 7, 28 y 90 [29]. Se puede reflejar también en el empleo de concreto masivos porque no se genera mucho calor de hidratación debido que se puede obtener la resistencia de concreto requerida de diseño con menos contenido de cemento esto va a conllevar a tener menos pasta de cemento, menos generación de calor, menos susceptibilidad de fisuración y un concreto más durable.

El efecto de la adición de nanosílice, Cu_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄ (ferrita de Cu-Zn) y NiFe₂O₄ (ferrita de Ni) para la resistencia a la tracción por división, compresión, flexión y el módulo de elasticidad del concreto. Se añadió nano-SiO₂, ferrita de Cu-Zn y ferrita de Ni, en cinco porcentajes (1 %, 2 %, 3 %, 4 % y 5 %) del peso de los materiales cementosos. Se utilizaron dos tipos de áridos grueso que son dolomita y granito y los resultados indicaron un 3% de peso en nano sílice y un 2% de peso de ferrita de Ni y ferrita de Cu-Zn. [30].

La incorporación de nanosílice en el compuesto cementoso portland al 19.20% de la masa compuesta demuestran que las pruebas de flexión y compresión son de 102.04% y 140.47% pero más altas que las de control con un 53.51% y 71.43% [31].

Por lo tanto la industria del concreto de cemento, se preocupa por el rendimiento y resistencia del concreto que utilizan aditivos minerales puzolánicos de tamaño nanométrico. Por ello, el uso de materiales de nano-SiO₂ ayudan en el comportamiento poroso del concreto y su microestructura se hace más consistente. Además, se analizó el comportamiento sinérgico del nano-SiO₂ comparando las propiedades tanto del concreto estudiado y el tradicional [32]. La resistencia final del concreto depende del proceso de hidratación del cemento que genera el gel de silicato de calcio hidratado (CSH) que es el responsable de la formación de cristales generadores de la resistencia mecánica del concreto, la nano-SiO₂ rompe la barrera energética e inicia la formación núcleos de cristalización del CSH haciendo un efecto puente entre las partículas de cemento, acelerando la consolidación de las partículas e incrementando la densidad por llenado del espacio de vacíos entre partículas, lo mencionado se va a materializar a través de la resistencia mecánica y durabilidad del concreto.

Donde añadiendo nanosílice en un 0.5%, 1.0% y 1.5% en peso del cemento. Se obtuvo una resistencia a la compresión 54.3 MPa, 59.24 MPa, 63.4 MPa y 48.2 MPa, respectivamente [33].

Se utilizó cemento Portland tipo I, con agregado grueso y fino, superplastificante y nano-SiO₂. El uso del nano-SiO₂ en un 5% del peso del aglutinante en una mezcla de concreto puede llegar a incrementar en un 23.4%-32.7% [34].

Se utilizó cemento tipo II en todas las mezclas de mortero. Los contenidos de C₃SM, C₂SM, C₃A y C₄AF del cemento fueron 48.68%, 20.33%, 2.82% y 11.99%, respectivamente. Se usó arena de sílice con peso específico de 2.6, absorción de agua de 0.6% y tamaño máximo de 5 mm. Además, se usó el humo de sílice fue en forma de polvo con un 95% de SiO₂, un peso específico de 2.35, un tamaño de partícula de 0.1 µm. Adicionalmente, se utilizó una solución de nano-SiO₂ que contenía 50% en peso de material sólido con un peso específico sólido de 2.86. Por último, se usó agua potable para el colado y curado de todas las muestras de mortero [35].

Utilizando cemento Portland con agregados finos y gruesos de 5 – 20 mm y 20 – 40 mm, además de polvo de nano-SiO₂ con una densidad de 2.2 g/cm³, también una mezcla química y agua de mezcla que al utilizar el agente reductor de agua tiene la disminución de un 10% en agua y el 1% de cemento. El contenido de

nano-SiO₂ fue respectivamente 0.5%, 0.75%, 1% y 1.5%, donde la resistencia a la tracción por flexión progreso en un 3.2%, 7.5%, 4.0% y 3.6% [36].

Se usaron agregados gruesos y finos, para la preparación de diferentes diseños de mezcla; donde el tamaño de partícula gruesos respectivamente de 14 mm, 10 mm y 7 mm en una proporción de 9:7:4. Además, se usó una mezcla de solución líquida de Na₂SiO₃ y NaOH, que es el activador alcalino líquido usado para los diferentes diseños de mezcla, el silicato de sodio (Na₂SiO₃) líquido y los gránulos de hidróxido de sodio (NaOH) de 98% de pureza. Por consiguiente, también fueron utilizados aluminosilicatos y nanosílice. Por último, se usó un superplastificante utilizado a base de polímeros en combinación, con un agente modificador para así lograr un equilibrio entre resistencia y fluidez [37].

El Uso del cemento Portland y la sílice coloidal en la pasta de cemento está compuesta por pequeños granos de silicato, que dentro de la composición química de los materiales cementosos se observa que posee 16.51% de nano-SiO₂, además de propiedades físicas de gravedad específica y área superficial específica de 3.20% y 0.318% respectivamente [38].

Para obtener concreto se realizó con cemento Portland de grado 53, arena de río natural y utilizar partículas de 50 nm de nano-SiO₂ con una proporción de mezcla de 1: 1.61: 2.68 y con 0.45 de proporción de agua-cemento. Las pruebas realizadas con concreto tradicional y con concreto con porcentajes de nano-SiO₂ de 2%, 4% y 6%, con muestras de 150 mm x 150 mm, se prepararon probetas de cilindros con resistencia a la tracción de 150 mm de diámetro y 300 mm de longitud con la mezcla diseñada con porcentajes de nano-SiO₂ y tracción dividida. Las pruebas se realizaron con dos rodillos de 38 mm de diámetro, también la evaluación de resistencia química con un 4% de nano-SiO₂ con solución 1% H₂SO₄, 1% HCl y 5% sulfato amónico [39]. El incremento natural de la resistencia mecánica del concreto debido a la incorporación de la nano-SiO₂ viene acompañado con beneficios de durabilidad debido a que se genera una microestructura más densa debido al efecto del puente y mayor presencia del gel CSH contribuyendo a la disminución del volumen y la distribución de los poros en el concreto generando un concreto más denso con menos porosidades con menos posibilidades que agentes externos penetren la masa de concreto afectándolo.

EL nano-SiO₂ en el concreto puede conducir cambios en las propiedades mecánicas, es decir en la resistencia a la compresión y flexión del concreto. En esta investigación, se utilizó un nano-SiO₂ de 15 nm en combinación humo sílice. Se observó un valor óptimo de 7.5% que utilizó 2.5 % de nano-SiO₂. También se observó el valor óptimo de resistencia a la flexión [40]. Tres muestras de concreto reforzado con nanonegro de carbón por cada porcentaje de peso de cemento (0.4%, 0.8% y 1.2%). Tres probetas de concreto reforzado con nano-SiO₂ por cada porcentaje de peso de cemento (0.2%, 0.4% y 0.6%) y tres probetas de concreto híbrido con nano aditivos ambos, las cuales son un total de 432 especímenes [37].

Se sintetizaron partículas esféricas de nano-SiO₂ con un alcóxido metálico, tetraetoxisilano, como material de partida y el amoníaco como catalizador base utilizando el método sol-gel. Se sintetizó con cuatro alcoholes metanol, propanol, etanol y butanol en diferentes temperaturas 25 °C, 50 °C, 70 °C y 90 °C. Los resultados muestran que la nano-SiO₂ se agrandó y se hizo uniforme con el aumento de temperatura [41]. La nano-SiO₂ reduce la susceptibilidad a la corrosión por cloruros en el acero estructural del concreto reforzado, alcanza altas resistencias tempranas sin castigar la resistencia final, con menos probabilidad a fisurarse aumentando la productividad en obra habiendo una reducción en el tiempo de curado.

Nanotubos de Carbono

La utilización de nanotubos de carbono para mejorar las propiedades mecánicas del concreto con diferentes porcentajes de peso 0.05, 0.1, 0.2 y 0.25 wt%. Se encontró el porcentaje de 0.22 wt% como dosis óptima, que aumentó la resistencia de tracción a un 46 % y la resistencia a la compresión a un 30.8 % [42].

Por otro lado, se investigó las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto de alta resistencia con nanotubos de carbono añadió 0.00 %, 0.03 %, 0.05 %, 0.10 % y 0.15 % de peso de mezclas del concreto de alta resistencia, denominadas CNT00, CNT03, CNT05, CNT10 y CNT15. Donde la resistencia a la compresión de los especímenes fue mayor a 114,40 MPa a los 28 días y alcanzó el requisito técnico [43].

Las características físicas de los nanotubos de carbono de un diámetro promedio de 9.5 nm y densidad promedio de 60 g/l que utilizó aditivo

superplastificante de policarboxilato con una dosis de 0.3 % - 2 % sobrepeso del cemento. Se centraron en estudiar el comportamiento que tendrán los nanotubos en el concreto de cemento Portland, para observar la viabilidad de concretos convencionales a la resistencia de compresión de 25 a 40 MPa. Además, se observó la resistencia mecánica y transporte de agua por la red de poros del concreto con y sin nanotubos de carbono [44].

Se investigó la incorporación del 6 % de nanotubos de carbono al recubrimiento de silicato pueda absorber la radiación electromagnética. Estas pruebas mostraron un incremento en la resistencia a las heladas del concreto, su resistencia en un 46 % y mejoras en su tenacidad a la fractura, lo que conduce a una mayor durabilidad del producto de concreto [45].

Los nanotubos con 6-25 nm de diámetro, 10.50 µm de longitud y 250-300 m²/g de área de superficie se utilizaron para la preparación de muestras de concreto, donde evaluaron su resistencia y comportamiento a los 3, 7, 28 y 56 días de curado. Sus resultados indican que la mezcla CNT0.10 que posee más cantidad de nanotubos obtuvo un 24.66% más de resistencia que la muestra de 56 días y la mezcla CNT0.05 da un mejor avance con 19.11% [46].

4 Revisión literaria de tipos de obras civiles donde se emplea nanomateriales

Concreto y cemento

La incorporación de nanotubos de carbono en el cemento mejora sus propiedades mecánicas resaltando resistencia a la flexión y compresión, además de la resistencia a la congelación y descongelación [47].

El uso de nanomateriales en los materiales de construcción mejora significativamente las propiedades físicas y mecánicas, además la aplicación de nanotubos de carbono en las pruebas del concreto presentó un incremento en la resistencia a las heladas y mejora su resistencia a las fracturas y aumenta su resistencia al 30% [48].

La incorporación de nanotecnología muestra una gran innovación en la industria de la construcción, además de que es muy eficiente para mejorar el

rendimiento de durabilidad de los materiales a base de cemento, siendo los nanomateriales más usados son el nano-SiO₂, nano-TiO₂, nano-Al₂O₃, nano-Fe₂O₃, también nanotubos y nanofibras de carbono, nanomateriales que permiten la regulación y manipulación de los productos de hidratación y su microestructura en materiales a base de cemento, para lograr sus propiedades deseables y rendimientos del ciclo de vida [49].

La aplicación de nanomateriales en el concreto aporta propiedades de durabilidad y la prevención de fisuras. El nano-SiO₂ genera un mejoramiento en su resistencia. El nano-TiO₂ genera beneficio de hidratación rápida y un mayor grado de hidratación. Finalmente, el nano-Fe₂O₃ aporta propiedades de resistencia a la compresión y a la abrasión [50].

El concreto, al añadirle nanomateriales como el nano-SiO₂, nanotubos de carbono o nanofibras, se puede producir con mejores resistencias mecánicas, acelera el tiempo de fraguado y condiciones de durabilidad, además que su aplicación es viablemente económica [51].

Se aplicó el nano-SiO₂ en el concreto en un 4% incrementa la resistencia a la compresión, flexión y tracción, además que otorga una mejor adherencia entre los áridos y la pasta de cemento, también otorga una buena trabajabilidad y acelera la hidratación en comparación al concreto convencional [52].

La aplicación de nano-SiO₂ mejora las propiedades mecánicas destacando la durabilidad en la mezcla pasta, mortero y concreto, para poder usar de manera eficiente este nanomaterial, primero se debe mezclar con cemento para tener una reacción perfecta, además que el uso del nano-SiO₂ en el concreto llega a aumentar la resistencia a la compresión entre 23.4% a 32.7% y la resistencia a la tracción entre 40.8% a 47.2% [53].

Siendo los ladrillos un material de construcción más usados en todo el mundo, la incorporación del nano-SiO₂ del 2.5% o el 3.5% en la mezcla del ladrillo de concreto aumenta la resistencia a la compresión y a la flexión significativamente, sin embargo, se puede obtener mayor aumento a la resistencia con menor contenido de cemento en la mezcla del ladrillo de concreto [54].

Acero

Esta estructura perlítica en alambres de acero es el mejor ejemplo de nanomateriales naturales, donde el

porcentaje de microestructura perlítica desarrollada en el proceso de patentamiento de plomo tiene influencia directa sobre la resistencia máxima a la tracción, la resistencia a la torsión y la reducción del área de los alambres patentados [55].

Para el acero en una solución de NaCl 0,5 M se acopló titanato como un fotoanodo en una solución de NaOH 1.0 M bajo iluminación, su potencial disminuyó, lo que indica un buen efecto de protección fotocatódica para el acero [56].

El efecto de nanotubos de carbón sobre las propiedades del hormigón agregado vidrio expandido y aerogel de sílice; donde los resultados del estudio muestran que la incorporación de nanotubos de carbón influye significativamente en la resistencia a la compresión y el rendimiento microestructural del hormigón ligero a base de aerogel [57].

Los nanotubos de carbono tienen características que generan grandes mejoras en el sector construcción y dentro de las más resaltantes es su alto módulo de elasticidad. Por ello, es utilizado para desarrollar mejoras en el acero estructural en el concreto armado [58].

El impacto de las adiciones de nanopartículas de carbono en juntas de unión a baja temperatura demuestran que un pequeño porcentaje de nanoplaquetas de grafeno o nanotubos de carbón mejora las propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas de las juntas, al tiempo que garantiza la reología adecuada de las pastas. [59].

Infraestructuras

Los nanomateriales tienen un gran potencial en aplicaciones de Infraestructura inteligente basada en estructuras de hormigón de alta resistencia; donde las infraestructuras modernas requieren componentes estructurales con mayor resistencia mecánica y mayor durabilidad. Una solución es la adición de nanomateriales con otros materiales de refuerzo como polvo de cáscara de arroz y cenizas volantes [60].

Además, mejora las propiedades mecánicas y de sostenibilidad de los pavimentos de concreto, el uso de nanomateriales aumenta la resistencia estructural y la durabilidad frente a elementos y compuestos químicos agresivos que prolongan la vida útil efectiva del pavimento de concreto, mejorando la gestión medioambiental.

La aplicación de la nanoarcilla obras de infraestructuras, genera beneficio en la estructura del asfalto que aumentan sus propiedades de mayor resistencia, capacidad de soporte en tráfico pesado que aumenta su rigidez y minimiza deformaciones, estos nanomateriales aumentan la vida útil de la vía y a la vez ayuda a disminuir los costos en mantenimiento y operación [61].

El uso de nanotubos de carbono aplicado en menor cantidad en la mezcla de concreto llega a presentar un comportamiento diferente en algunas propiedades mecánicas, donde mejora la resistencia a la flexión y tracción, además de generar grandes aumentos en la resistencia a la compresión [62].

La utilización nano-Fe₃O₄ trabaja como un relleno el cual aumenta la densidad del material cementoso. Sin embargo, hay que tener en cuenta que este no afecta la hidratación del cemento. También existe un aumento en la resistencia a la compresión hasta de un 20% con un 3% en peso del material cementante. [63].

Para los investigadores, el uso de nanotubos de carbono ofrece ventajas extraordinarias en el asfalto porque alcanzan cantidades similares a otros tipos de asfaltos modificados y no tiene defecto. En el asfalto tradicional, se puede producir un 25.00% de deformación, y cuando se aplica este nanomaterial, su deformación desciende a menos del 5.00%. Esto es cinco veces la deformación del asfalto natural, una situación similar ocurre con la fatiga [64]. El dióxido de titanio adicionado como aglutinante de asfalto convencional genera una degradación de partículas orgánicas e inorgánicas que conlleva la eliminación de contaminantes atmosféricos. Por ello, Estados Unidos utiliza este tipo de nanomaterial en el 94 % en sus pistas asfaltadas [65].

5 Por qué el uso de nanomateriales en obras civiles

La nanotecnología es la nueva revolución industrial, ya que con esta genera construcción sustentable y ecoeficientes. Con diferentes medios de utilización como son delgadas películas, recubrimientos, mezclas en polvo, adiconamiento en líquido, tecnología de acristalamiento conmutable y células fotovoltaicas [66].

La aplicación de nanomateriales genera grandes beneficios en la industria de la construcción, además

que los nanotubos de carbono son un gran candidato para la futura generación de material compuesto estructural y de alto rendimiento debido a que el uso de los nanotubos de carbono genera ultra alta resistencia y mejoras en las propiedades mecánicas [42].

El uso de nanomateriales y nanoprodutos en diversos materiales de construcción para mejorar sus propiedades, físicas y químicas. Su aplicación está en el concreto que mejora su resistencia, en el acero de refuerzo frente a la corrosión, uso de nanocompuestos para rechazar polvo, humedad, la protección y aislamiento UV, materiales como pinturas, selladores, impermeabilizantes, con componentes electrónicos, filtros de agua, entre otras [67].

El uso de la nanotecnología genera ventajas en la arquitectura, como el desarrollo de materiales que resisten más que el acero. Además, ofrece mejores soluciones prácticas a corto, mediano y largo plazo. También, el uso de nanomateriales puede ser posible de tener edificios con mucha resistencia ante un sismo [68].

El uso de nanomateriales puede innovar la tecnología fotoquímica en las construcciones. Hay muchos métodos que son baratos y sencillos los cuales se pueden utilizar para mejorar el medio ambiente. De acuerdo con la resistencia a la compresión se recomienda aplicarlo sobre la superficie de concreto como un recubrimiento superficial. [69]

El uso de la nanotecnología también abarca en el ámbito de la reparación de concreto en estructuras donde se recomienda el uso en pequeñas grietas de 300 µm. hasta de máximo 1mm de ancho [70].

Los nanomateriales tiene sus múltiples usos, además de sus propiedades nuevas y únicas, por su forma, tamaño y su estructura interna que tienen aplicaciones y uso potenciales en varios aspectos, por ejemplo en modificar las propiedades mecánicas, eléctricas, interlaminares, ópticas, químicas, electroquímicas, de protección electromagnética y balísticas de cualquier material [71].

El uso de nanomateriales en las mezclas de concreto mejora sus propiedades y su hidratación. Los nanomateriales son muy eficiente si tienen una dispersión adecuada logrando mejores resultados.

En investigaciones realizadas encontraron que una pequeña cantidad de adición en estado fresco tendrá los siguientes efectos: 1) aumento de la tasa de hidratación, 2) el calor de hidratación y 3) reducción de la tendencia a la pérdida y segregación de agua. Por otro lado, sus desventajas son la disminución de la trabajabilidad. En estado endurecido, aumentará la resistencia al impacto y aumenta y disminuye la permeabilidad [72].

La contribución de nano-ZrO₂, nano-Fe₃O₄, nano-TiO₂ y nano-Al₂O₃ mejora las propiedades mecánicas del hormigón de alto rendimiento es mayor que la de otras nanopartículas. Las nanopartículas tienen un efecto significativo en la mejora de los parámetros de durabilidad. [25]

El uso de nano-TiO₂ en mezclas de concreto conduce a una disminución del valor de asentamiento y del factor de compactación. Un aumento en el porcentaje de nano-TiO₂ aumentará el contenido de polvo en el concreto, reduciendo así el libre movimiento de partículas con la misma relación agua-cemento. Por otro lado, el impacto en el concreto que se rellena con nano-TiO₂ resultará en una mejora en la resistencia del concreto. El 1% de nano-TiO₂ puede ser el mejor contenido y sustituto del cemento en el concreto. En comparación con el cemento convencional, puede mejorar el concreto. [73]

Las propiedades de la microestructura para la resistencia del concreto poroso son importantes. Por ello los aditivos puzolánicos, como la nanosílice, son muy beneficiosos porque es una tecnología moderna el cual obtiene un alto rendimiento en las propiedades del concreto porque la nano-SiO₂ hace que la reacción de hidratación de la matriz de cemento fuera más completa [74, 75].

La aplicación de los nanotubos de carbono (CNT) influye significativamente en la resistencia a la compresión en un 41% y al rendimiento microestructural del hormigón, mostrando la presencia de gel CSH que rodea a los nanotubos de carbono dentro de la estructura de hormigón. Esta capacidad que incluso puede causar autoreparaciones en micro fisuras y de autolimpieza, siempre y cuando se incorpore este nanomaterial para llegar a más propiedades de mejora [76].

La implementación de la nanotecnología en el concreto es factible ya que el concreto es el material de construcción más utilizado en el mundo, por lo que cualquier mejora del concreto dará lugar a cambios en

la industria de la construcción mundial. Encontrar formas innovadoras de resolver problemas de confiabilidad mediante el uso de nanotecnología conducirá a estructuras más seguras y eficientes, ahorros de costos y un medio ambiente más limpio. El uso y la producción masiva de concreto ha llevado a investigadores e ingenieros a encontrar continuamente formas innovadoras de mejorar la calidad y el rendimiento del concreto para aplicaciones específicas. Además, el uso de la tecnología de nanopartículas en la producción de concreto hará un material ambientalmente sostenible. [23]

En el sector construcción ha sido incorporado con resultados sorprendentes y positivos porque el concreto se puede modificar añadiendo nanomateriales con el fin de controlar su comportamiento mejorando sus propiedades. Además, permiten estructuras con mejor calidad e interesantes ahorros asociados a la disminución de materiales. Esto muestra los retos de hoy en día en el sector construcción [77].

6 Conclusiones

De acuerdo a la información revisada, donde el uso de diferentes nanomateriales para la producción de concreto, se concluye que:

Las diferentes investigaciones y desarrollo dan a conocer que la nanotecnología ayuda con el rendimiento de los materiales. Se utilizaron en muchas aplicaciones del concreto, por su tamaño las nanopartículas muestran un cambio en sus propiedades físicas químicas.

En los resultados mostrados, en varias investigaciones, nos muestran que los nanomateriales presentan una dificultad que es convertir al concreto en un material trabajable. Se indica que la solución es la adición de aditivos que aumenten la plasticidad del concreto. Además, muestran que se debe tener en cuenta la cantidad de agua que requiera la mezcla para obtener los mejores resultados en la mejora de las propiedades mecánicas del concreto.

Al usar el nano-TiO₂ en el concreto contribuyendo a limpiar el aire del CO₂, donde la sustitución en un rango de 0.5 a 2 %, aumenta la resistencia a la compresión en un 8 %; al igual que el nano-SiO₂ mejora la durabilidad del concreto. En cambio, el uso de nanotubos de carbono mejora la resistencia a la flexión y tracción. En el caso del Nano-Fe₂O₃ solo con

4% de su peso se obtiene una mejora en su resistencia y absorción al agua en la pasta de cemento.

La incorporación de nanomateriales en ciertos porcentajes genera un buen impacto en las propiedades del concreto duro y endurecido. A la vez, un exceso de este genera resistencias menores a la de un concreto convencional [78].

Referencias

- [1] C. G. LIZARAZO-SALCEDO, E. E. GONZALEZ-JIMENEZ y C. Y. G.-A. J. ARIAS-PORTELA, Nanomateriales: un acercamiento a lo básico. *Medicina y Seguridad del Trabajo*. v. 64, nº 251, p. 109-118, 2018.
- [2] D. d. I. Iglesia, R. E. Cachau, M. García-Remesal y V. Maojo, Nanoinformatics knowledge infrastructures: bringing efficient information management to nanomedical research. *Computational Science & Discovery*. v. 6, nº 1, p. 28, 2013.
- [3] A. Chatterjee, Nanoparticulate matters in cement, concrete & construction - Performance & EHS perspectives. *Indian Concrete Journal*. v. 91, nº 2, p. 12-24, 2017.
- [4] A. Adesina, Durability Enhancement of Concrete Using Nanomaterials: An Overview. *Materials Science Forum*. v. 967, p. 221-227, 2019.
- [5] J. B. Jiménez, Nanotecnología: La ciencia al servicio del patrimonio histórico. *MoleQla: Revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*. nº 22, p. 36-38, 2016.
- [6] C. Ozyildirim y C. Zegetosky, Exploratory investigation of nanomaterials to improve strength and permeability of concrete. *Transportation Research Record*. v. 2142, nº 1, p. 1-8, 2010.
- [7] M. Mohd y et al., An Overview on the Performance of Nano Silica Materials on the Properties of Porous Concrete Pavement. *Penerbit Akademia Baru*. v. 1, nº 1, p. 34-42, 2014.
- [8] J. Liu, Q. Li y S. Xu, Influence of nanoparticles on fluidity and mechanical properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*. v. 101, nº 1, p. 892-901, 2015.
- [9] J. Lee, S. Mahendr y P. J. J. Alvarez, Nanomaterials in the Construction Industry: A Review of Their Applications and Environmental Health and Safety Considerations. *ACS Nano*. v. 4, nº 7, p. 3580-3590, 2010.
- [10] M. I. M. Yusak, R. P. Jaya, M. R. Hainin y M. H. W. Ibrahim, Utilization of Nano Silica as Cement Paste in Mortar and Porous Concrete Pavement. *Advanced Materials Research*, v. 1113, p. 135-139, 2015.
- [11] A. S. Dahlan, Smart and Functional Materials Based Nanomaterials in Construction Styles in Nano-Architecture. *Silicon*. v. 11, p. 1949-1953, 2019.
- [12] Saloma, A. Nasution, IswandiImran y M. Abdullah, Improvement of Concrete Durability by Nanomaterials. *Procedia Engineering*. v. 125, p. 608-612, 2015.
- [13] M. Safiuddin, M. Gonzalez, J. Cao y S. Tighe, State-of-the-art report on use of nanomaterials in concrete. *International Journal of Pavement Engineering*. v. 15, nº 10, p. 37-41, 2014.
- [14] P. Brightson y et al., Strength & durability analysis of nano clay in concrete. *Life Science Journal*. v. 10, nº 7, p. 1172-1177, 2013.
- [15] L. Molina y M. Garzón, Propiedades de concretos y morteros modificados con nanomateriales: estado del arte. *Arquetipo*. v. 14, p. 81-98, 2017.
- [16] Z. Zhao, R. Sun, G. Xin, S. Wei y D. Huang, A Review: Application of Nanomaterials in Concrete. *Applied Mechanics and Materials*, Vols. %1 de %2405-408, p. 2881-2884, 2013.
- [17] A. Peyvandi, P. Soroushian, N. Farhadi y A. M. Balachandra, Evaluation of the Reinforcement Efficiency of Low-Cost Graphite Nanomaterials in High-Performance Concrete. *KSCCE Journal of Civil Engineering*. v. 22, nº 10, p. 3875-3882, 2018.
- [18] N. Makul, Advanced smart concrete - A review of current progress, benefits and challenges. *Journal of Cleaner Production*. v. 274, p. 1-25, 2020.
- [19] M. Brangança y et al., The Use of 1% Nano-Fe₃O₄ and 1% Nano-TiO₂ as Partial

Replacement of Cement to Enhance the Chemical Performance of Reinforced Concrete Structures. **Athens Journal of Technology and Engineering**. v. 4, nº 2, p. 97-107, 2017.

[20] A. Joshaghani, M. Balapour, M. Mashhadian y T. Ozbakkaloglu, Effects of nano-TiO₂, nano-Al₂O₃, and nano-Fe₂O₃ on rheology, mechanical and durability properties of self-consolidating concrete (SCC): An experimental study. **Construction and Building Materials**. v. 245, p. 1-14, 2020.

[21] M. Suneel, K. Jagadeep, k. K. MahaLakshmi, G. P. Babu y G. V. Ramarao, An Experimental Study on Workability and Strength Characteristics of M40 Grade Concrete by Partial Replacement of Cement with Nano-TiO₂. **Sustainable Construction and Building Materials**. v. 25, p. 253-263, 2018.

[22] T. Fuentes, C. Vasquez y K. Vasquez, Incorporación de nanomateriales en el concreto fotocatalítico para la reducción de NO_x y CO₂. **Revista de Energía Química y Física**. v. 3, nº 8, p. 50-56, 2016.

[23] M. A. Kewalramani y Z. I. Syed, Application of nanomaterials to enhance microstructure and mechanical properties of concrete. **International Journal of Integrated Engineering**. v. 10, nº 2, p. 98-104, 2018.

[24] A. Maury Ramirez, J. P. Nikkanenb, M. Honkanen, K. Demeestere, . E. Levänen y N. De Belie, TiO₂ coatings synthesized by liquid flame spray and low temperature sol-gel technologies on autoclaved aerated concrete for air-purifying purposes. **Materials Characterization**. v. 87, p. 74-85, 2014.

[25] A.H.Shekari y M.S.Razzaghi, Influence of Nano Particles on Durability and Mechanical Properties of High Performance Concrete. **Procedia Engineering**. v. 14, p. 3036-3041, 2011.

[26] M. Zhang y et al., Durability of concrete with nano-particles under combined action of carbonation and alkali silica reaction. **Building Structures and Materials**. v. 16, nº 5, p. 421-429, 2019.

[27] D. S. Ng, S. C. Paula, V. Anggraini, S. Y. Kong, T. S. Qureshi, C. R. Rodriguez, Qing-fengLiu y B. Šavija, Influence of SiO₂, TiO₂ and Fe₂O₃ nanoparticles on the properties of fly ash

blended cement mortars. **Construction and Building Materials**. v. 258, p. 11, 2020.

[28] A. Khoshakhlagh, A. Nazari y G. Khalaj, Effects of Fe₂O₃ Nanoparticles on Water Permeability and Strength Assessments of High Strength Self-Compacting Concrete. **Journal of Materials Science & Technology**. v. 28, nº 1, p. 73-82, 2012.

[29] K. Rahmani, M. Ghaemian y A. Hosseini, Experimental study of the effect of water to cement ratio on mechanical and durability properties of Nano-silica concretes with Polypropylene fibers. **Scientia Iranica**. v. 26, nº 5, p. 2712-2722, 2019.

[30] M. Amin y K. A. el-hassan, Effect of using different types of nano materials on mechanical properties of high strength concrete. **Construction and Building Materials**. v. 80, p. 116-124, 2015.

[31] H. Li y Y. Shi, High-Strength, Waterproof, Corrosion-Resistant Nano-Silica Carbon Nanotube Cementitious Composites. **Materials**. v. 13, nº 17, p. 1-18, 2020.

[32] W. Gebru, A. K. Rath y D. K. Bera, Individual and Combined Effect of Nano- and Microsilica on Cement-Based Product. **Recent Developments in Sustainable Infrastructure**. v. 75, p. 427-440, 2020.

[33] K. S. J. Kumar, M. V. S. Rao, V. S. Reddy y S. Shrihari, Performance evaluation of nano-silica concrete. **E3S Web of Conferences**. v. 184, nº 01076, p. 1-6, 2020.

[34] Jonbi, P. H. Simatupang, A. Andreas y A. Nugraha, The long-term effects of nano-silica on concrete. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. v. 508, p. 22-23, 2018.

[35] M. Mahdikhania y A. A. Ramezani pour, Mechanical properties and durability of self consolidating cementitious materials incorporating nano silica and silica fume. **Computers and Concrete**. v. 14, nº 2, p. 175-191, 2014.

[36] H. Yang, Strength and Shrinkage Property of Nano Silica Powder Concrete. **Advances in Intelligent Systems Research**. p. 0794-0797, 2012.

- [37] G. Saini y U. Vattipalli, Assessing properties of alkali activated GGBS based self-compacting geopolymer concrete using nano-silica. **Case Studies in Construction Materials**. v. 12, p. 9, 2020.
- [38] Ltifia, A. Guefrech, P. Mounanga y A. Khelidj, Experimental study of the effect of addition of nano-silica on the behaviour of cement mortars Mounir. **Procedia Engineering**. v. 10, p. 900-905, 2011.
- [39] S. Thenmozhi, V. G. A. Vignesh y S. Suganthan, Experimental investigation of the effect of Nano-silica on the mechanical properties of concrete. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**. v. 923, p. 7, 2020.
- [40] S. S. Lone, M. Gupta y G. Mehta, Comparative Study of Nano-Silica Induced Mortar, Concrete and Self-Compacting Concrete – A Review. **Indian Journal of Science and Technology**. v. 9, nº 44, p. 1-7, 2016.
- [41] L. P. Singh, S. K. Bhattacharyya y S. Ahalawat, Preparation of Size Controlled Silica Nano Particles and Its Functional Role in Cementitious System. **Journal of Advanced Concrete Technology**. v. 10, nº 11, p. 345-352, 2012.
- [42] S. S. Shang y X. B. Song, Experimental Research on Mechanicals Performance of Carbon Nanotubes Reinforced Concrete. **Applied Mechanics and Materials**. v. 858, p. 173-178, 2016.
- [43] L. Lu, D. Ouyang y W. Xu, Mechanical Properties and Durability of Ultra High Strength Concrete Incorporating Multi-Walled Carbon Nanotubes. **Materials**. v. 9, nº 6, p. 1-11, 2016.
- [44] C. G. N. Marcondes, M. H. F. Medeiros, J. M. Filho y P. Helene, Nanotubos de carbono en concreto de cemento Portland. Influencia de la dispersión en las propiedades mecánicas y en la absorción de agua. **Revista ALCONPAT**. v. 5, nº 2, p. 97-114, 2015.
- [45] G. Yakovlev, G. Pervushin, I. Maeva, J. Keriene, I. Pudov, A. Shaybadullina, A. Buryanov, A. Korzhenko y S. Senkov, Modification of Construction Materials with Multi-Walled Carbon Nanotubes. **Procedia Engineering**. v. 57, p. 407-413, 2013.
- [46] A. Khitab y S. Ahmad, Fracture toughness and failure mechanism of high performance concrete incorporating carbon nanotubes. **Frattura ed Integrità Strutturale**. v. 11, nº 42, p. 238-248, 2017.
- [47] D. Castañeda-Saldarriaga, J. Alvarez-Montoya, V. Martínez-Tejada y J. Sierra-Pérez, Effect of multiwalled carbon nanotube in cement composite on mechanical strength and freeze-thaw susceptibility. **Advances in Civil Engineering Materials**. v. 4, nº 1, p. 257-274, 2015.
- [48] G. Yakovlev, G. Pervushin, I. Maeva, J. Keriene, I. Pudov, A. Shaybadullina, A. Buryanov, A. Korzhenko y S. Senkov, Modification of Construction Materials with Multi-Walled Carbon Nanotubes. **Procedia Engineering**. v. 57, p. 407-413, 2013.
- [49] S. Du, J. Wu, O. A. Shareedah y X. Shi, Nanotechnology in cement-based materials: A review of durability, modeling, and advanced characterization. **Nanomaterials**. v. 9, nº 9, p. 1-29, 2019.
- [50] J. Lee, S. Mahendra y P. J. J. Alvarez, Nanomaterials in the Construction Industry: A Review of Their Applications and Environmental Health and Safety Considerations. **ACS NANO**. v. 4, nº 7, p. 3580-3590, 2010.
- [51] S. H. Moreno y S. C. S. d. I. Torre, Applications of Nanocomposites in Architecture and Construction. **Contexto**. v. 11, nº 14, p. 63-75, 2017.
- [52] S. Thenmozhi, V. Gowri, A. Vignesh y S. Suganthan, Experimental investigation of the effect of Nano-silica on the mechanical properties of concrete. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. v. 923, nº 1, p. 1-6, 2020.
- [53] Jonbi, P. Simatupang, A. Andreas y A. Nugraha, The long-Term effects of nano-silica on concrete. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. v. 508, nº 1, p. 1-6, 2019.
- [54] E. T. Dawood y M. S. Mahmood, Production of Sustainable concrete brick units using Nano-silica. **Case Studies in Construction Materials**. v. 14, p. 1-16, 2021.

- [55] B. S.S, N. Suri y R. Belokar, Alambre de acero perlítico: nanomaterial natural a base de acero con alto contenido de carbono mediante proceso de patente de plomo. **MaterialstodayPROCEEDINGS**. v. 3, nº 6, p. 1553-1562, 2016.
- [56] Y. Zhu, J. Zhang, R. Du, H. Qi, L. Xu y C. Lin, Estudio sobre una película de titanato y su efecto de protección fotocatódica sobre acero inoxidable 403 acero. **Recubrimientos para la protección contra la corrosión**. v. 41, nº 15, p. 107-113, 2012.
- [57] K. A. Suman, R. Žymantas, T. Simona y K. Deepankar, Efectos de carbón nanotubos sobre hormigón ligero a base de aerogel de sílice y vidrio expandido. **Informes científicos**. v. 11, nº 1, p. 1-11, 2021.
- [58] A. Hassan, A. Shoeib y M.A. El-Magied's, Use of carbon nanotubes in the retrofitting of reinforced concrete beams with an opening and the effect of direct fire on their behaviour. **International Journal of GEOMATE**. v. 14, nº 44, p. 149-158, 2018.
- [59] J. Szałapak, K. Kiełbasiński, Ł. Dybowska-Sarapuk, J. Krzeminski, M. Teodorczyk, T. Kowaluk y M. Jakubowska, Influence of Carbon Nanoparticles Additives on Nanosilver Joints in LTJT Technology. **Journal of Electronic Packaging, Transacciones de la ASME**. v. 143, nº 3, p. 4, 31 Julio 2021.
- [60] G. K. Bautista, M. A. Herrera, L. J. Santamaría, M. A. Honorato y C. S. Zamora, Progreso reciente en nanomateriales para la infraestructura de hormigón moderna: ventajas y desafíos. **Materiales**. v. 12, nº 21, p. 61, 2019.
- [61] J. Sobczak-Piąstka, U. Marushchak, O. Mazurak. y A. Mazurak, Nanomodified Rapid Hardening Concretes. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. v. 960, nº 3, 2020.
- [62] S. Anwar, S. Rao, L. Giuseppe y I. Mustajab, Fracture toughness and failure mechanism of high performance concrete incorporating carbon nanotubes. **Frattura ed Integrità Strutturale**. v. 11, nº 42, p. 238-248, 2017.
- [63] P. Sikora, E. Horszczaruk, K. Cendrowski y E. Mijowska, The Influence of Nano-Fe₃O₄ on the Microstructure and Mechanical Properties of Cementitious Composites. **Nanoscale Research Letters**. v. 11, nº 1, p. 77-311, 2016.
- [64] T. Mendes, D. Hotza y W. Repetir, Nanoparticles in cement based materials: A review. **Reviews on Advanced Materials Science**. v. 40, nº 1, p. 89-96, 2015.
- [65] M. M. Hassan, L. Mohammad y S. Cooper, Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. **Transportation Research Record**. v. 2207, 2011.
- [66] F. Pacheco-Torgal, M. Diamanti, A. Nazari y C. Granqvist, Nanotechnology in eco-efficient construction: Materials, processes and applications. **Nanotechnology in Eco-Efficient Construction: Materials, Processes and Applications**, p. 1-443, 2013.
- [67] S. H. Moreno y S. C. S. d. I. Torre, Applications of Nanocomposites in Architecture and Construction. **Revista de la Facultad de Arquitectura y Construcción**. v. 11, nº 14, 2017.
- [68] D. V. Pavan Kumar, S. Amit y M. Sri Rama Chand, Influence of various nano-size materials on fresh and hardened state of fast setting high early strength concrete [FSHESC]: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**. v. 227, 1 Noviembre 2021.
- [69] M. Brangança, K. Portella, C. Marçal, E. Silva y E. Alberti, The Use of 1% Nano-Fe₃O₄ and 1% Nano-TiO₂ as Partial Replacement of Cement to Enhance the Chemical Performance of Reinforced Concrete Structures. **Athens Journal of Technology and Engineering**. v. 4, nº 2, p. 97-107, 2017.
- [70] N. De Belie, E. Gruyaert, A. Al-Tabbaa, P. Antonaci, D. Bajare, A. Darquennes, R. Davies, L. Ferrara, T. Jefferson, C. Litina, B. Miljevic, A. Otlewska, J. Ranogajec, M. Roig-Flores, K. Paine, P. Lukowski, P. Serna, J. Tulliani y S. Vucetic, A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures. **Advanced Materials Interfaces**. v. 5, nº 17, 2018.
- [71] T. Hassan, A. Salam, A. Khan, S. U. Khan, H. Khanzada, M. Wasim, M. Q. Khan y I. Kim, Functional nanocomposites and their potential

applications: A review. **Journal of Polymer Research**. v. 28, nº 2, 2021.

[72] X. Song , C. Li, D. Chen y X. Gu, Interfacial mechanical properties of recycled aggregate concrete reinforced by nano-materials. **Construction and Building Materials**. v. 270, 2021.

[73] M. Suneel, K. Jagadeep, K. MahaLakshmi, G. Praveen y G. Ramarao, An Experimental Study on Workability and Strength Characteristics of M40 Grade Concrete by Partial Replacement of Cement with Nano-TiO₂. **Sustainable Construction and Building Materials**. v. 25, p. 253-263, 2018.

[74] M. I. M. Yusak, R. P. Jaya, M. R. Hainin y M. H. Wan, A Review of Microstructure Properties of Porous Concrete Pavement Incorporating NanoSilica. **Journal of Engineering and Applied Sciences**. v. 11, nº 20, p. 11832-11835, 2016.

[75] A. Yang y H. Wu, Study on mechanical properties of modified concrete based on nano state silica. v. 26, nº 4, p. 795-801, 2019.

[76] S. Adhikary, Ž. Rudžionis, S. Tučkutė y D. Ashish, Effects of carbon nanotubes on expanded glass and silica aerogel based lightweight concrete. **Scientific Reports**. v. 11, nº 1, 2021.

[77] Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., Construcción y Tecnología en Concreto. *Revista CYT*, v. 6, nº 2, p. 1-60, 2016.

[78] S. N. M. Saliyah, N. M. Nor y M. I. Jamaludin, The Effects of TiO₂ in the Performance of Mortar. **Applied Mechanics and Materials**. Vols. %1 de %2773-774, p. 1027-1031, 2015.

[79] M.Rezania, M.Panahandeh, S.M.J.Razavi y F.Berto, Experimental study of the simultaneous effect of nano-silica and nano-carbon black on permeability and mechanical properties of the concrete. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**. v. 104, p. 10, 2019.