







## ARTÍCULO DE REVISIÓN

### **Efecto de los nanomateriales en las propiedades mecánicas del concreto: Una revisión 2021-2025**

### **Effect of nanomaterials on the mechanical properties of concrete: A review 2021–2025**

Fernando García <sup>1</sup><sup>\*</sup>, Brayan Domínguez <sup>2</sup>, Brian Gonzáles <sup>3</sup>, Cristhian Ramos <sup>4</sup>, José Piedra <sup>5</sup> y Nilthon Arce <sup>6</sup>

#### **RESUMEN**

El artículo aborda los efectos de la aplicación de nanomateriales (NM) en el comportamiento mecánico del concreto, considerando su aplicación en forma de adición y reemplazo parcial del cemento. Mediante una exploración exhaustiva en diversas plataformas científicas entre ellas Scopus, Scielo, Dialnet, Latindex y Google Scholar, publicados entre 2021-2025. Se identificaron los tipos de nanomateriales más utilizados, sus proporciones óptimas y sus efectos sobre el rendimiento del hormigón. Los resultados muestran que no existe una dosis universal, la eficacia varía según el tipo y forma de incorporación. Entre los hallazgos más relevantes destacan la nanoarcilla (NC) con proporciones óptimas entre 4% y 5% en sustitución, el óxido de grafeno (GO) con niveles máximos del 1% y el nano-TiO<sub>2</sub> (NT) con una alta variabilidad dependiente del contexto experimental. La nanosilice (NS) evidenció mejoras notables en resistencia y durabilidad, aunque reduce la trabajabilidad del concreto fresco. Se concluye que el uso dosificado de nanomateriales mejora la resistencia del concreto frente a compresión, tracción y flexión, reduce la permeabilidad y mejora la durabilidad, constituyendo una estrategia tecnológica clave para mitigar la huella ambiental del concreto y extender su vida útil.

**Palabras clave:** Concreto, sostenibilidad, adición, sustitución y nanomateriales.

#### **ABSTRACT**

The article addresses the effects of the application of nanomaterials (NM) on the mechanical behavior of concrete, considering their application in the form of addition and partial replacement of cement. Through an exhaustive exploration of various scientific platforms, including Scopus, Scielo, Dialnet, Latindex, and Google Scholar, published between 2021 and 2025. The most commonly used types of nanomaterials, their optimal proportions, and their effects on concrete performance were identified. The results show that there is no universal dosage; effectiveness varies depending on the type and form of incorporation. Among the most relevant findings are nano-clay (NC) with optimal proportions between 4% and 5% in substitution, graphene oxide (GO) with maximum levels of 1%, and nano-TiO<sub>2</sub> (NT) with high variability depending on the experimental context. Nanosilica (NS) showed notable improvements in strength and durability, although it reduces the workability of fresh concrete. It is concluded that the measured use of nanomaterials improves compressive, tensile, and flexural strength, reduces permeability, and improves durability, constituting a key technological strategy for mitigating the environmental footprint of concrete and extending its useful life.

**Keywords:** Concrete, sustainability, addition, substitution, and nanomaterials.

\* Autor para correspondencia

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Jaén, Perú. Email: [fernando.garcia@est.unj.edu.pe](mailto:fernando.garcia@est.unj.edu.pe), [brayan.dominguez@est.unj.edu.pe](mailto:brayan.dominguez@est.unj.edu.pe), [brian.gonzales@est.unj.edu.pe](mailto:brian.gonzales@est.unj.edu.pe), [cristhian.ramos@est.unj.edu.pe](mailto:cristhian.ramos@est.unj.edu.pe), [jpiedrat@unj.edu.pe](mailto:jpiedrat@unj.edu.pe) y [nilthon\\_arce@unj.edu.pe](mailto:nilthon_arce@unj.edu.pe)

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento sostenido del sector construcción ha incrementado significativamente la demanda mundial de concreto, generando simultáneamente mayores preocupaciones relacionadas con el impacto ambiental de la industria cementera. La producción de cemento representa aproximadamente el 8 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>, alcanzando alrededor de 1,600 millones de toneladas métricas liberadas únicamente durante 2022 (Purton, 2024). Este problema se encuentra directamente asociado a los procesos de fabricación del clínker y al elevado consumo energético requerido durante la producción del cemento, convirtiendo a esta industria en una de las principales fuentes de emisiones contaminantes a nivel mundial (KUNAK, 2025). De manera complementaria, la Agencia Internacional de Energía señala que cerca del 40 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> y aproximadamente el 36 % del consumo energético final están vinculados al sector de edificaciones, considerando tanto la fase constructiva como las etapas de operación y mantenimiento (En Obra, 2023).

Frente a esta problemática, la búsqueda de materiales cementicios con mayor desempeño mecánico y menor impacto ambiental ha impulsado el desarrollo de investigaciones orientadas a tecnologías emergentes aplicadas al concreto. Entre ellas, la nanotecnología ha adquirido especial interés debido a su capacidad para modificar la microestructura del material a escala nanométrica, permitiendo optimizar propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad. Diversos estudios sostienen que la incorporación de nanomateriales favorece una estructura interna más compacta, disminuye la porosidad y mejora la hidratación del cemento, aspectos que contribuyen a incrementar la resistencia y prolongar la vida útil de las estructuras (Bautista et al., 2019).

En los últimos años, distintos nanomateriales como la nanosílice, el óxido de grafeno, la nanoarcilla y el nano-TiO<sub>2</sub> han mostrado resultados favorables en el comportamiento del concreto, particularmente frente a esfuerzos de compresión, tracción y flexión. Asimismo, algunos autores reportan mejoras relacionadas con la impermeabilidad, resistencia química y reducción de procesos de deterioro en ambientes agresivos (Del Campo & Negro, 2021). Los nanomateriales potencian la resistencia de los materiales cementicios aportando ventajas a la mezcla resultante, actuando como aislantes térmicos, aumentan la resistencia y la durabilidad, reducen la permeabilidad y proporcionan propiedades auto limpiantes y purificantes (Macías et al., 2024). De igual manera, la incorporación de nanopartículas ha permitido desarrollar materiales con propiedades avanzadas, tales como capacidad autolimpiante, aislamiento térmico

y comportamiento fotocatalítico, representando una alternativa prometedora para el desarrollo de infraestructuras sostenibles (Khan et al., 2024).

En el Perú, esta situación adquiere mayor relevancia debido al crecimiento sostenido de la actividad constructiva. El despacho nacional de cemento en agosto de 2025 superó las 1,153 mil toneladas métricas, representando un incremento de 4.40 % respecto al año anterior (ASOCEM, 2025). Este escenario evidencia la necesidad de implementar soluciones tecnológicas capaces de mejorar el desempeño del concreto y, simultáneamente, disminuir el impacto ambiental asociado al elevado consumo de cemento. En ese sentido, la nanotecnología aplicada a materiales cementicios representa una alternativa con alto potencial para contribuir al desarrollo de construcciones más sostenibles y duraderas (Singh, 2024).

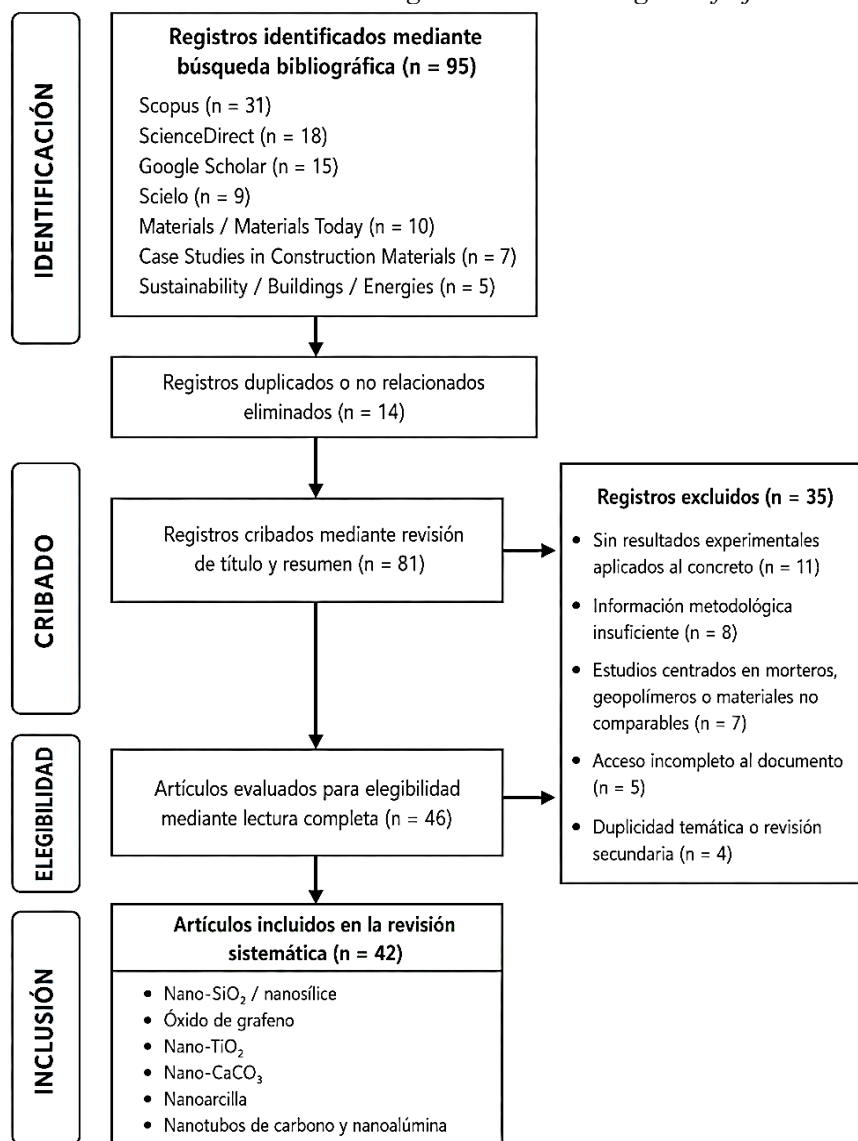
Este estudio tiene como objetivo analizar críticamente las investigaciones publicadas entre 2021 y 2025 sobre el uso de nanomateriales en el concreto, identificando las proporciones óptimas de incorporación mediante adición y sustitución parcial del cemento, comparando sus efectos sobre las propiedades mecánicas y estableciendo tendencias recientes relacionadas con el desempeño y sostenibilidad del material.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Para desarrollar el presente artículo de revisión se desarrolló una búsqueda rigurosa con la finalidad de obtener información relevante, mediante los lineamientos PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), priorizando investigaciones de análisis experimentales y revisiones de artículos que comprenden los últimos 5 años (2021-2025), utilizando bases de datos científicas y plataformas académicas reconocidas, entre ellas Scopus, Scielo, Dialnet, Latindex y Google Scholar. La estrategia de búsqueda se estructuró mediante combinaciones de palabras clave en español, inglés ó portugués relacionadas con el tema de investigación, tales como: “nanomateriales”, “concreto”, “nanosílice”, “óxido de grafeno”, “nano-TiO<sub>2</sub>”, “nanoarcilla”, “mechanical properties of concrete”, “nanomaterials in concrete”, “compressive strength”, “durability” y “sustainable concrete”. Asimismo, se emplearon operadores booleanos AND y OR para optimizar la precisión de los resultados obtenidos.

**Figura 1**

Selección de artículos mediante diagrama de metodología de flujo PRISMA2020



*Nota:* El diagrama de flujo PRISMA 2020 se realizó en 4 fases: identificación de registros, cribado, elegibilidad e inclusión, con una selección de 42 artículos relevantes.

La información del proceso de selección y evaluación de pertinencia, se priorizó documentos provenientes de revistas científicas arbitradas y de acceso verificable. Los estudios elegidos, posteriormente organizados con el propósito de identificar el tipo de nanomaterial empleado, método de incorporación (adición o sustitución parcial del cemento), proporciones utilizadas, propiedades evaluadas y principales aportes identificados en el comportamiento mecánico y de durabilidad del concreto. Este procedimiento permitió establecer relaciones entre los distintos tipos de nanopartículas estudiadas y su influencia sobre las propiedades mecánicas

del concreto, contribuyendo a una mejor comprensión del potencial de estas tecnologías en el desarrollo de materiales más sostenibles y resistentes.

## RESULTADOS

Este campo de la ciencia se ocupa del análisis y el cambio de materia a escalas nanométricas, tomando como cuentas a los nanomateriales que tienen alguna dimensión en el rango de 1-100 nm, teniendo en cuenta que el nanómetro equivale a la milmillonésima parte de un metro. Genera un impacto significativo en industrias como el de la tecnología, la química, la ingeniería, la medicina o la agricultura entre muchas otras (Navarro, 2025). Puesto que brindan una mejora notable, convirtiendo las soluciones convencionales en opciones más eficaces y con mayor vida útil.

Es una alternativa frente a las inquietudes en torno a la sostenibilidad, considerando que a nivel mundial la actividad constructiva figura entre los sectores con mayor demanda energética (Cristel, 2024).

Debido a su tamaño, los nanomateriales, al añadirlos al concreto mejoran su rendimiento y generan variaciones notables en las características. Si bien incorporar nanomateriales genera un impacto positivo en las propiedades del hormigón, aplicarlo en exceso puede traer consigo aspectos desfavorables (Caballero et al., 2021).

En la tabla 1, la información recopilada fue analizada de manera comparativa y crítica con el propósito de identificar tendencias recientes, proporciones óptimas de incorporación y efectos recurrentes asociados al uso de nanomateriales en mezclas de concreto fresco.

**Tabla 1**

*Clasificación de nanomateriales en el concreto, incorporación, proporción óptima y sus principales aportes*

Grupo de nanomaterial	Autor	Tipo de nanomaterial	Incorporación	Proporción óptima	Principales aportes
	Dongo & Saavedra	Nanosílice (NS)	Adición	0.5% para la relación agua cemento 0.6 y 0.7% para las relaciones a/c de 0.55	Incrementa la resistencia compresiva a edades tempranas y aumenta la demanda de agua
	Alvansaz et al.	Nanosílice (NS)	Adición	1.5%	Mejora resistencia compresiva y tracción indirecta
	Mohammadfarid et al.	Nanosílice (NS)	Adición	0.25%	Optimiza microestructura y mayores porcentajes reducen trabajabilidad

<b>Nanosílice y derivados silícicos</b>	Alvansaz et al.	Nanosílice (NS) + Microsílice	Adición	3% NS y 15% microsílice	Incrementa resistencia compresiva y disminuye trabajabilidad Mejora compresión, flexión, módulo elástico y reduce contracción Reduce poros y mejora desempeño mecánico Reduce porosidad y mejora resistencia frente a congelamiento Mejora resistencia compresiva y comportamiento térmico
	Loganathan & Mohammed	NS + caucho granulado (CR)	Adición	NS 1%–2%	Reduce porosidad y permeabilidad Optimiza las propiedades mecánicas
	Varisha et al.	Nanosílice (NS)	Adición	1%	Mejora resistencia en mezclas con 30% GGBS
	Tarangini et al.	Nano sílice	Adición	3%	Mejora comportamiento térmico hasta 200 °C
	Saleh et al.	Nano-SiO <sub>2</sub>	Adición	3%	Incrementa compresión y tracción. Reduce impacto ambiental Mejora compresión, flexión y aceleración de hidratación
	Caballero et al.	Nanosílice	Adición	0.8%–1%	Incrementa compresión, tracción y flexión
	Bravo et al.	Nanosílice + lana de roca	Sustitución	1.4% NS + 6% LR	Mejora resistencia y trabajabilidad Altos porcentajes reducen resistencia compresiva
	Alqamish & Al	Nanosílice (NS)	Sustitución	1%	Incrementa compresión y su exceso prolonga fraguado
	Dahish & Almutairi	Nanosílice (NS)	Sustitución	3%	Mejora hidratación y
	Najaf et al.	Nanosílice (NS)	Sustitución	3%	
	Orakzai	Nanoalúmina + nano-TiO <sub>2</sub>	Adición	0.5%–1%	
	Pathak & Vesmawala	Nano TiO <sub>2</sub>	Adición	4%	
	Jayakalyani et al.	Nanoóxido de titanio	Adición	0.6%	
<b>Nanotitanio y derivados</b>	Wu et al.	Nano-TiO <sub>2</sub>	Sustitución	2%	
	Rawat et al.	Nano-TiO <sub>2</sub>	Sustitución	2%	
	Suneel & Rama	Nano-TiO <sub>2</sub>	Sustitución	1%	

					compresión. Exceso reduce tracción Favorece hidratación y resistencia compresiva
	Sun et al.	Nano-TiO <sub>2</sub>	Sustitución	0.5%	Mejora compresión y tracción indirecta
	Vidya & Vasudev	Nano dióxido de titanio	Sustitución	3%	Incrementa compresión, tracción y flexión
	Sastry et al.	Nano dióxido de titanio	Sustitución	5%	Mejora desempeño eléctrico y mecánico
	Roopa et al.	Fibra de carbono (CF)+ MWCNT	Adición	0.05% MWCNT + 0.05% CF	Mejora compresión, tracción y resistencia a sulfatos
	Ahmad et al.	Nano grafito (NGP)	Adición	5%	Incrementa compresión y flexión
	Long et al.	GO + sílice	Adición	0.01%	Mejora compresión, tracción y flexión
	Varisha et al.	CNT	Adición	0.30%	Incrementa compresión, flexión y módulo elástico
<b>Grafeno y nanotubos de carbono</b>	Hong et al.	Óxido de grafeno (GO)	Adición	0.05%	Reduce permeabilidad y mejora resistencia
	Bheel et al.	GO + PVA	Sustitución	0.05% GO + 1% PVA	Altas proporciones afectan propiedades frescas
	Abdulkadir et al.	GO + caucho granulado	Sustitución	0.067% GO + 6.8% CR	Mejora compresión y tracción
	Noori et al.	Nanoarcilla (NC)	Sustitución	5%	Mejora comportamiento térmico
<b>Nanoarcilla y materiales autocurativos</b>	Dahish & Almutairi	Nanoarcilla (NC)	Sustitución	5%	Favorece autocuración y sellado de fisuras
	Thakur et al.	Nanoarcilla (NC)	Sustitución	4%	Potencial óptimo de autocuración
	Sravanthi & Sashidhar	Nanopartículas de dióxido	Sustitución	2%	Reduce poros y mejora compresión, flexión y tracción
	Reddy & Ramujee	Nanoalúmina Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Adición	2%	Mejora desgaste e hidratación
	Zhu et al.	Nano-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Adición	0.16%	

<b>Nano-CaCO<sub>3</sub> y nanopartículas minerales</b>	Alomayri & Adesina	Nano CaCO <sub>3</sub>	Adición	2%	Mejora propiedades mecánicas
	He et al.	Metacaolín	Adición	20%	Refina estructura porosa
	Othuman Mydin et al.	Magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	Adición	0.25%	Mejora compresión, tracción y flexión
	Othuman Mydin et al.	Nano-CaCO <sub>3</sub>	Adición	4%	Incrementa durabilidad y resistencia
	Poudyal et al.	Nano carbonato de calcio	Sustitución	1%	Incrementa impermeabilidad y compresión
	Alvansazyaz di et al.	Nanopartículas de sílice	Sustitución	2%	Mejora elasticidad y resistencia
	Poudyal et al.	Nano-CaCO <sub>3</sub>	Sustitución	1%	Mejora módulo de elasticidad
	Hakuzweyezu et al.	Nano-CaCO <sub>3</sub>	Sustitución	1%	Resistencia a sulfatos e impermeabilidad
Yang et al.	Nano-CaCO <sub>3</sub>	Sustitución	1%	Reduce corrosión y mejora flexión	

## DISCUSIÓN

Los resultados evidencian que el desempeño de los nanomateriales (NM) en el concreto depende principalmente de tres factores: tipo de nanopartícula, mecanismo de incorporación (adición o sustitución) y dosificación óptima. Los estudios revisados coinciden en que pequeñas variaciones en la proporción modifican significativamente la microestructura del concreto, alterando propiedades mecánicas, térmicas y de durabilidad. Sin embargo, también se identificaron discrepancias experimentales relacionadas con la dispersión de partículas, relación agua-cemento, compatibilidad química y condiciones de curado, aspectos que explican la variabilidad de resultados entre investigaciones.

En relación con las proporciones óptimas, los resultados muestran diferencias importantes según el tipo de nanomaterial. La nanoarcilla (NC) presentó porcentajes óptimos relativamente elevados, entre 4 % y 5 %, asociados principalmente a procesos de autocuración y sellado de microfisuras (Thakur et al., 2024; Noori et al., 2022). Este comportamiento puede explicarse por su capacidad de absorción y expansión interna, que favorece la formación de productos de hidratación secundarios y la reducción de vacíos capilares. En contraste, el óxido de grafeno (GO) alcanzó mejoras mecánicas significativas con contenidos inferiores al 1 % (Hong et al., 2022; Bheel et al., 2023), debido a su elevada área superficial y capacidad de actuar como puente entre microfisuras, mejorando la adherencia entre la pasta cementicia y los

agregados. Esto evidencia que los nanomateriales basados en carbono requieren dosis considerablemente menores para modificar el comportamiento del concreto.

El Nano-TiO<sub>2</sub> (NT) mostró la mayor dispersión de resultados experimentales. Algunos estudios reportaron incrementos importantes en resistencia mecánica y aceleración de hidratación (Pathak & Vesmawala, 2022; Jayakalyani et al., 2023), mientras que otros identificaron disminuciones progresivas de resistencia cuando la dosificación aumentaba excesivamente (Wu et al., 2022). Estas discrepancias sugieren que este posee alta sensibilidad frente a variables como tamaño de partícula, relación agua-cemento y método de dispersión. Desde el punto de vista físico-químico, el NT actúa como núcleo de nucleación para los productos de hidratación; no obstante, concentraciones elevadas favorecen la aglomeración de nanopartículas, generando zonas débiles y pérdida de homogeneidad en la matriz cementicia.

La nanosílice (NS) fue el nanomaterial más investigado y con resultados más consistentes. Los estudios reportaron mejoras en compresión, tracción, permeabilidad y densificación de la matriz usando porcentajes generalmente inferiores al 3 % (Dongo & Saavedra, 2021; Alvansaz et al., 2022; Caballero et al., 2021). Este comportamiento se relaciona con su elevada reactividad puzolánica, ya que la NS consume hidróxido de calcio y genera mayor cantidad de gel C-S-H, responsable del incremento de resistencia mecánica. Sin embargo, Mohammadfarid et al. (2025) demostró que dosis superiores al valor óptimo reducen trabajabilidad y resistencia, debido al aumento de superficie específica y demanda de agua. Por tanto, aunque la NS presenta alta eficiencia mecánica, también requiere un control riguroso de dispersión y contenido de agua.

En cuanto al nanocarbonato de calcio (Nano-CaCO<sub>3</sub>), los estudios mostraron resultados más uniformes, concentrando sus proporciones óptimas entre 1 % y 4 % (Poudyal et al., 2021; Hakuzweyezu et al., 2021; Yang et al., 2024). Su principal contribución está relacionada con el efecto filler y la aceleración de hidratación temprana, permitiendo reducir porosidad y mejorar impermeabilidad. Además, varios autores identificaron mejoras frente a ambientes agresivos con sulfatos y procesos de corrosión, lo que evidencia su potencial para aplicaciones en infraestructuras expuestas a ambientes marinos o industriales.

Otro aspecto relevante corresponde al mecanismo de incorporación. La sustitución parcial del cemento mostró ventajas ambientales importantes al reducir el consumo de clínker y, por consiguiente, disminuir emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la producción cementicia (Poudyal et al., 2021). Sin embargo, algunos estudios advirtieron que reemplazos elevados aceleran el

proceso de hidratación y alteran el tiempo de fraguado (Alqamish & Al, 2021), afectando la estabilidad del concreto fresco. Por otro lado, la incorporación mediante adición fue más eficiente en nanomateriales de alta reactividad y baja dosificación, como GO y NS, ya que pequeñas cantidades lograron cambios significativos sin modificar sustancialmente la proporción volumétrica de la mezcla (Roopa et al., 2022).

Los resultados también permitieron identificar una relación directa entre el uso de nanomateriales y la mejora integral de la durabilidad del concreto. La reducción de porosidad observada en NS, GO y Nano-CaCO<sub>3</sub> disminuyó permeabilidad, absorción y penetración de agentes agresivos, mejorando la resistencia frente a sulfatos y corrosión (Bheel et al., 2023).

## **CONCLUSIONES**

La investigación nos demuestra que no hay una proporción óptima universal, cada nanomaterial tiene un rango de adición/sustitución donde se logra resultados óptimos, son relativamente bajas entre 0.25 % y el 5% del peso del cemento. El Óxido de grafeno (GO) es potente en dosis como máximo del 1.0%, tanto en sustitución como en adición. Contrario a ello, la Nanoarcilla (NC) es más efectiva en sustitución en concentraciones del 4% al 5%, mientras que el Nano carbonato de calcio (Nca) y el Nano-TiO<sub>2</sub> (NT) presentan proporciones más elevadas en el caso de adición. Además, el Nano-TiO<sub>2</sub> (NT) presento mayor dispersión en ambos métodos, esto sugiere mayor dependencia a las condiciones del proceso de mezcla. Para todos los casos, un porcentaje mayor al óptimo de nanomaterial produce un efecto negativo en las propiedades del hormigón.

El análisis de los factores clave entre la incorporación de nanomateriales por sustitución y adición nos indica que la estrategia de sustitución ofrece beneficios de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y aumenta el desempeño, siendo más conveniente para reducir la cantidad de cemento utilizada, es importante considerar que podría comprometerse la resistencia inicial y la degradación de sus propiedades si se excede la dosis. Para el caso de la adición de nanomateriales (NM), se aprecia un fortalecimiento temprano de las propiedades relacionadas con la tracción y la flexión, este método es favorable para nanomateriales que actúan en bajas proporciones como el caso (Óxido de grafeno).

El uso de nanomateriales (NM) aporta un efecto considerable en el desempeño mecánico del concreto. Se observan mejoras destacadas en el comportamiento estructural del concreto, particularmente en su capacidad para resistir cargas a compresión, tracción y flexión. Asimismo,

se observa un incremento notable en la durabilidad, reflejado en la disminución de la permeabilidad, absorción y resistencia a ataques externos.

Nanomateriales como Nanosílice (NS), el Óxido de grafeno (GO), y la Nanoarcilla (NC) sobresalen por su capacidad de optimizar el desempeño mecánico del concreto, especialmente en compresión, tracción y flexión. Para lograr una mayor reducción de la permeabilidad y absorción, el GO es el nanomaterial que ofrece mejores resultados. El Nano CaCO<sub>3</sub> y el GO tienen mayor impacto en la resistencia a la corrosión y ataques de sulfatos. La NC destaca por la capacidad de autocuración y la mejora del aislamiento térmico. Sin embargo, los nanomateriales presentan un desafío al disminuir la trabajabilidad del concreto fresco, lo que implica el uso de plastificantes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdulkadir, I., Mohammed, B., Ali, M., & Liew, M. (2022). Effects of Graphene Oxide and Crumb Rubber on the Fresh Properties of Self-Compacting Engineered Cementitious Composite Using Response Surface Methodology. *Materials*, *15*, 1–19. <https://doi.org/10.3390/MA15072519>
- Ahmad, F., Jamal, A., Iqbal, M., Alqurashi, M., Almoshaogeh, M., Al-Ahmadi, H., & Hussein, E. (2021). Performance Evaluation of Cementitious Composites Incorporating Nano Graphite Platelets as Additive Carbon Material. *Materials*, *15*, 1–26. <https://doi.org/10.3390/MA15010290>
- Alomayri, T., & Adesina, A. (2021). The influence of nano CaCO<sub>3</sub> on the mechanical performance of micro glass-reinforced geopolymer paste. *Arabian Journal of Geosciences*, *14*, 1–7. <https://doi.org/10.1007/S12517-021-07839-0/METRICS>
- Alqamish, H., & Al, A. (2021). Development and Evaluation of Nano-Silica Sustainable Concrete. *Applied Sciences*, *11*, 1–21. <https://doi.org/10.3390/APP11073041>
- Alvansaz, M., Arévalo, B., & Arévalo, J. (2022). Eco-friendly concrete pavers made with Silica Fume and Nanosilica Additions. *INGENIO*, *5*, 34–42. <https://doi.org/10.29166/INGENIO.V5I1.3784>

- Alvansaz, M., Bombon, C., & Rosero, B. (2022). Study of the Incorporation of Nano-SiO<sub>2</sub> in High-Performance Concrete (HPC). *INGENIO*, 5, 12–21. <https://doi.org/10.29166/INGENIO.V5I1.3786>
- Alvansazyazdi, M., Alvarez, F., Pinto, J., Khorami, M., Bonilla, P., Debut, A., & Feizbahr, M. (2023). Evaluating the Influence of Hydrophobic Nano-Silica on Cement Mixtures for Corrosion-Resistant Concrete in Green Building and Sustainable Urban Development. *Sustainability*, 15, 1–7. <https://doi.org/10.3390/SU152115311>
- ASOCEM. (2025). *Reporte Estadístico Mensual*. <https://www.asocem.org.pe/estadisticas-nacionales/reportes-estadistico-mensual-agosto-2025>
- Bautista, K., Herrera, A., Santamaría, J., Honorato, A., & Zamora, S. (2019). Recent Progress in Nanomaterials for Modern Concrete Infrastructure: Advantages and Challenges. *Materials*, 12, 1–40. <https://doi.org/10.3390/MA12213548>
- Bheel, N., Mohammed, B., Liew, M., & Zawawi, N. (2023). Effect of Graphene Oxide as a Nanomaterial on the Durability Behaviors of Engineered Cementitious Composites by Applying RSM Modelling and Optimization. *Buildings*, 13, 1–42. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13082026>
- Bravo, A., Gallardo, W., Muñoz, S., Rodríguez, E., & Fernández, J. (2024). Analysis of the physical-mechanical performance of the concrete partially substituting the cement by nanosilica and the coarse aggregate by rock wool. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 32, 1–15. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052024000100218>
- Caballero, P., Damiani, C., & Ruiz, Á. (2021). Optimization of the concrete through the addition of nanosilice, using aggregates of the cantera de Añashuayco de Arequipa. *Revista Ingeniería de Construcción*, 36, 71–87. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732021000100071>
- Cristel. (2024). *La nanotecnología en la arquitectura: revolucionando la eficiencia y la durabilidad*. <https://www.cristel.com.mx/blog/nanotecnologia-en-la-arquitectura>
- Dahish, H., & Almutairi, A. (2023). Effect of elevated temperatures on the compressive strength of nano-silica and nano-clay modified concretes using response surface

methodology. *Case Studies in Construction Materials*, 18, 1–19.

<https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2023.E02032>

Del Campo, J., & Negro, V. (2021). Nanomaterials in Protection of Buildings and Infrastructure Elements in Highly Aggressive Marine Environments. *Energies*, 14, 1–13.

<https://doi.org/10.3390/EN14092588>

Dongo, P., & Saavedra, O. (2021). INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE NANOSÍLICE EN LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO. *VÉRITAS*, 21, 29–38.

<https://doi.org/10.35286/VERITAS.V22I1.292>

En Obra. (2023, May 25). *Eficiencia energética en construcción: óptimo consumo de energía*.

<https://www.en-obra.com/es/noticias/construccion-representa-el-40-del-uso-de-energia>

Hakuzweyezu, T., Qiao, H., Lu, C., Yang, B., & Li, K. (2021). Life Prediction Model of Nano-CaCO<sub>3</sub> Modified Concrete in Sulfate Environment. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25, 3054–3063.

<https://doi.org/10.1007/S12205-021-1880-1>

He, Z., Wang, B., Shi, J., Liu, D., Liu, J., Wang, D., & Hu, Y. (2023). Drying shrinkage and microstructural evolution of concrete with high-volume and low-grade metakaolin.

*Journal of Building Engineering*, 76, 1–8. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.107206>

Hong, X., Lee, J., & Qian, B. (2022). Mechanical Properties and Microstructure of High-Strength Lightweight Concrete Incorporating Graphene Oxide. *Nanomaterials*, 12, 1–15.

<https://doi.org/10.3390/NANO12050833>

Jayakalyani, P., Sujatha, T., Nithin, P., Mydili Priya, CH., & Mouni, J. (2023). Study on effects of TiO<sub>2</sub> Nano particles on properties of concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1280, 1–11. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1280/1/012007>

Khan, S., Amjad, H., Ahmad, F., & Khan, H. (2024). A Scientometric Review Summarizing the Impact of Nanomaterials on the Fresh, Hardened, and Durability Properties of Cement-Based Materials. *Advances in Civil Engineering*, 2024, 1–20.

<https://doi.org/10.1155/ADCE/8639483>

- KUNAK. (2025, July 10). *Impacto ambiental de la industria cementera: desafíos y soluciones tecnológicas*. <https://kunakair.com/es/impacto-ambiental-industria-cementera/>
- Loganathan, R., & Mohammed, B. S. (2021). Properties of Rubberized Engineered Cementitious Composites Containing Nano-Silica. *Materials*, *14*, 1–18. <https://doi.org/10.3390/MA14133765>
- Long, Z., Chen, Y., Yin, W., Wu, X., & Wang, Y. (2022). The Effects of Graphene Oxide-Silica Nano-Hybrid Materials on the Rheological Properties, Mechanical Properties, and Microstructure of Cement-Based Materials. *Materials*, *15*, 1–24. <https://doi.org/10.3390/MA15124207>
- Macías, M., Cedeño, J., Morales, C., Tinizaray, R., Perero, G., Rodríguez, J., & Jarre, C. (2024). Nanomaterials in construction industry: An overview of their properties and contributions in building house. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, *10*, 1–14. <https://doi.org/10.1016/J.CSCEE.2024.100863>
- Mohammadfarid, A., Carlosama, A., Rosillo, J., Bonilla, P., Patrice, D., Santamaria, J., Cadena, H., Logacho, A., & Tapia, J. (2025). Development of Oat Husk-Derived Nano-Silica for High-Performance and Sustainable Mortar Applications. *INGENIO*, *2*, 127–142. <https://doi.org/10.29166/INGENIO.V8I2.8165>
- Najaf, E., Orouji, M., & Zahrai, S. M. (2022). Improving nonlinear behavior and tensile and compressive strengths of sustainable lightweight concrete using waste glass powder, nanosilica, and recycled polypropylene fiber. *Nonlinear Engineering*, *11*, 58–70. <https://doi.org/10.1515/NLENG-2022-0008/MACHINEREADABLECITATION/RIS>
- Navarro, M. (2025). La nanotecnología: una técnica para mejorar la sostenibilidad - Neumáticos en verde. *Blog SIGNUS*. <https://blog.signus.es/la-nanotecnologia-una-tecnica-para-mejorar-la-sostenibilidad/>
- Noori, A., Yubin, L., Saffari, P., Zhang, Y., & Wang, M. (2022). The optimum percentage of nano clay (NC) in both direct-additive and sonicated modes to improve the mechanical properties of self-compacting concrete (SCC). *Case Studies in Construction Materials*, *17*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01493>

- Orakzai, M. (2021). Hybrid effect of nano-alumina and nano-titanium dioxide on Mechanical properties of concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 14, 1–9.  
<https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2020.E00483>
- Othuman Mydin, M. A., Jagadesh, P., Bahrami, A., Dulaimi, A., Özkılıç, Y. O., Al Bakri Abdullah, M. M., & Jaya, R. P. (2023). Use of calcium carbonate nanoparticles in production of nano-engineered foamed concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 4405–4422. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2023.08.106>
- Othuman Mydin, M. A., Mohd Navi, M., Mohamed, O., & Sari, M. (2022). Mechanical Properties of Lightweight Foamed Concrete Modified with Magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) Nanoparticles. *Materials*, 15, 1–17. <https://doi.org/10.3390/MA15175911>
- Pathak, S., & Vesmawala, G. (2022). Effect of nano TiO<sub>2</sub> on mechanical properties and microstructure of concrete. *Materials Today: Proceedings*, 65, 1915–1921.  
<https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.05.161>
- Poudyal, L., Adhikari, K., & Won, M. (2021a). Mechanical and Durability Properties of Portland Limestone Cement (PLC) Incorporated with Nano Calcium Carbonate (CaCO<sub>3</sub>). *Materials*, 14, 1–18. <https://doi.org/10.3390/MA14040905>
- Poudyal, L., Adhikari, K., & Won, M. (2021b). Nano Calcium Carbonate (CaCO<sub>3</sub>) as a Reliable, Durable, and Environment-Friendly Alternative to Diminishing Fly Ash. *Materials*, 14, 1–16. <https://doi.org/10.3390/MA14133729>
- Purton, M. (2024, September 13). *El cemento es un gran problema para el medio ambiente. Aquí te explicamos cómo hacerlo más sostenible.*  
<https://www.weforum.org/stories/2024/09/cement-production-sustainable-concrete-co2-emissions/>
- Rawat, G., Gandhi, S., & Murthy, Y. (2023). Durability Aspects of Concrete Containing Nano- Titanium Dioxide. *ACI Materials Journal*, 120, 25–35.  
<https://doi.org/10.14359/51738490>

- Reddy, N., & Ramujee, K. (2022). Comparative study on mechanical properties of fly ash & GGBFS based geopolymer concrete and OPC concrete using nano-alumina. *Materials Today: Proceedings*, 60, 399–404. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.01.260>
- Roopa, A., Hunashyal, A., & Mysore, R. (2022). Development and Implementation of Cement-Based Nanocomposite Sensors for Structural Health Monitoring Applications: Laboratory Investigations and Way Forward. *Sustainability*, 14, 1–15. <https://doi.org/10.3390/SU141912452>
- Saleh, A., Attar, A., Ahmed, O., & Mustafa, S. (2021). Improving the thermal insulation and mechanical properties of concrete using Nano-SiO<sub>2</sub>. *Results in Engineering*, 12, 1–9. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2021.100303>
- Sastry, K., Sahitya, P., & Ravitheja, A. (2021). Influence of nano TiO<sub>2</sub> on strength and durability properties of geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1017–1025. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.03.139>
- Singh, A. (2024). The Role of Nanotechnology in Enhancing Durability and Sustainability of Construction Materials. *AZoBuild*. <https://www.azobuild.com/article.aspx?ArticleID=8707>
- Sravanthi, M., & Sashidhar, C. (2024). Experimental Study on Self Healing Concrete by using the Silicon Dioxide Nano Particles and Crystalline Admixture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1326, 1–9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1326/1/012051>
- Sun, J., Tian, L., Yu, Z., Zhang, Y., Li, C., Hou, G., & Shen, X. (2020). Studies on the size effects of nano-TiO<sub>2</sub> on Portland cement hydration with different water to solid ratios. *Construction and Building Materials*, 259, 1–16. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120390>
- Suneel, M., & Rama, G. (2024). Effect of Nano-TiO<sub>2</sub> at macro and micro level of concrete by partial substitution of cement. *Research on Engineering Structures & Materials*, 11, 1545–1559. <https://doi.org/10.17515/RESM2024.402MA0817RS>

- Tarangini, D., Sravana, P., & Srinivasa Rao, P. (2022). Effect of nano silica on frost resistance of pervious concrete. *Materials Today: Proceedings*, *51*, 2185–2189. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.11.132>
- Thakur, A., Reddy, V., Chandrashekar, R., Sura, S., Kumar, M., & Reddy, M. (2024). Self-Healing Capability enhancement of Concrete using Nano clay and Crystalline Admixture as Sustainable Material. *E3S Web of Conferences*, *596*, 1–7. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202459601026>
- Varisha, Zaheer, M. M., & Hasan, S. D. (2021). Mechanical and durability performance of carbon nanotubes (CNTs) and nanosilica (NS) admixed cement mortar. *Materials Today: Proceedings*, *42*, 1422–1431. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.01.151>
- Vidya, J., & Vasudev, R. (2023). Experimental investigation on properties of concrete incorporating TiO<sub>2</sub>. *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research-DISCONTINUED*. <https://doi.org/10.7770/SAFER-V12N-ART776>
- Wu, L., Mei, M., Li, Z., Liu, S., & Wang, X. (2022). Study on photocatalytic and mechanical properties of TiO<sub>2</sub> modified pervious concrete. *Case Studies in Construction Materials*, *17*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01606>
- Yang, B., Hu, X., & Qiao, H. (2024). Enhancing Durability of Concrete in Saline Soil with Nano-CaCO<sub>3</sub> Modification: Investigation and Reliability Analysis. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *28*, 3791–3804. <https://doi.org/10.1007/S12205-024-0895-9>
- Zhu, J., Zhu, L., Feng, C., Guan, X., Sun, Y., & Zhang, W. (2021). Effect of Nano-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> on the Mechanical Properties of Cement-Based Materials. *Crystals*, *11*, 1–16. <https://doi.org/10.3390/CRYST11121556>