

Nanostructured Photocatalytic Concrete with TiO₂ for Increased Durability of Infrastructure Projects

Carlos Magno Chavarry Vallejos, Doctor¹; Liliana Janet Chavarria Reyes, Doctor(c)²; Joaquín Samuel Támara Rodríguez, Doctor³; Enriqueta Pereyra Salardi, Doctor(c)⁴; Jackeline Carol Escobar Serrano, Magister⁵; Kelly Raquel Pazos Sedano, Magister⁶; David Minaya Huerta, Doctor⁷

^{1,2,4,5} Universidad Ricardo Palma, Perú, carlos.chavarry@urp.edu.pe; liliana.chavarria@urp.edu.pe; enriqueta.pereyra@urp.edu.pe; jackeline.escobar@urp.edu.pe, ^{3,6,7} Universidad Santiago Antúnez de Mayolo, Perú, jtamarar@unasam.edu.pe, kpazoss@unasam.edu.pe, dminayah@unasam.edu.pe

Abstract. - Concrete structures often face significant durability challenges due to pollution, humidity, and chemical attacks, leading to high maintenance costs and impacting regional sustainability. To enhance their resilience, the incorporation of nanostructured photocatalytic materials, such as titanium dioxide (TiO₂), emerges as an innovative solution. This study aimed to investigate the impact of nanostructured TiO₂ on concrete properties to increase the durability of infrastructure projects. The methodology, deductive-experimental in nature, included evaluating mechanical properties (compression and flexural strength) according to NTP E.060 and ASTM C39/C39M standards, analyzing photocatalytic activity, and determining the microstructure using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). The results show a significant improvement in compressive strength (a 15% increase at 28 days, reaching 69.7 MPa with a 1.5% TiO₂ addition) and flexural strength (an increase from 10.10% to 42.44%). A 30% reduction in capillary porosity and a 40% reduction in water absorption were observed, which improves impermeability and resistance to aggressive agents. These findings suggest that TiO₂ densifies the concrete's microstructure, extending the lifespan of infrastructure. It is concluded that the addition of this titanium dioxide nanomaterial substantially increases the durability and performance of photocatalytic concrete. This research contributed to the development of advanced materials and sustainable construction solutions, important for more resilient and low-maintenance infrastructure.

Keywords: Nanostructured Photocatalytic Concrete, titanium dioxide, durability, resilience, sustainability

Hormigón Fotocatalítico Nanoestructurado con TiO₂ para Incrementar la Durabilidad de los Proyectos de Infraestructura

Carlos Magno Chavarry Vallejos, Doctor¹; Liliana Janet Chavarría Reyes, Doctor(c)²; Joaquín Samuel Támara Rodríguez, Doctor³; Enriqueta Pereyra Salardi, Doctor(c)⁴; Jackeline Carol Escobar Serrano, Magister⁵; Kelly Raquel Pazos Sedano, Magister⁶; David Minaya Huerta, Doctor⁷

^{1,2,4,5} Universidad Ricardo Palma, Perú, carlos.chavarry@urp.edu.pe; liliana.chavarria@urp.edu.pe; enriqueta.pereyra@urp.edu.pe; jackeline.escobar@urp.edu.pe, ^{3,6,7} Universidad Santiago Antúnez de Mayolo, Perú, jtamarar@unasam.edu.pe, kpazoss@unasam.edu.pe, dminayah@unasam.edu.pe

Resumen. - El hormigón enfrenta desafíos significativos de durabilidad debido a la contaminación, la humedad y los ataques químicos, lo que genera altos costos de mantenimiento y afecta la sostenibilidad regional. Para mejorar su resiliencia, la incorporación de materiales fotocatalíticos nanoestructurados, como el dióxido de titanio (TiO₂), emerge como una solución innovadora. Este estudio tuvo como objetivo investigar el impacto del TiO₂ nanoestructurado en las propiedades del hormigón, con el fin de incrementar la durabilidad de los proyectos de infraestructura. La metodología, de naturaleza deductiva-experimental, incluyó la evaluación de propiedades mecánicas (compresión y flexión) según las normas NTP E.060 y ASTM C39/C39M, el análisis de la actividad fotocatalítica y la determinación de la microestructura mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (XRD). Los resultados muestran una mejora significativa en la resistencia a la compresión (un aumento del 15% a los 28 días, alcanzando 69.7 MPa con una adición del 1.5% de TiO₂) y a la flexión (un incremento del 10.10% al 42.44%). Se observó una reducción del 30% en la porosidad capilar y del 40% en la absorción de agua, lo que mejora la impermeabilidad y la resistencia a agentes agresivos. Estos hallazgos sugieren que el TiO₂ densifica la microestructura del hormigón, prolongando la vida útil de las infraestructuras. Se concluye que la adición de este nanomaterial de dióxido de titanio aumenta sustancialmente la durabilidad y el desempeño del hormigón fotocatalítico. Esta investigación contribuyó al desarrollo de materiales avanzados y soluciones de construcción sostenible, importantes para infraestructuras más resilientes y de bajo mantenimiento.

Palabras clave: Hormigón fotocatalítico nanoestructurado, dióxido de titanio, durabilidad, resiliencia, sostenibilidad.

I. INTRODUCCIÓN

La ingeniería civil busca soluciones constructivas sostenibles y duraderas frente a la degradación del hormigón por factores ambientales como la humedad, cloruros, sulfatos y dióxido de carbono atmosférico. La carbonatación, que reduce la alcalinidad del hormigón y causa corrosión del acero de refuerzo, es una de las principales causas de falla estructural prematura. Ante la preocupación por la calidad del aire, la nanotecnología ofrece vías para mejorar el hormigón, incorporando nanopartículas de dióxido de titanio (nano-TiO₂)

que confieren propiedades multifuncionales al material [1]. El TiO₂, un semiconductor fotocatalítico, degrada contaminantes orgánicos e inorgánicos bajo irradiación UV o visible, lo que contribuye a la autolimpieza de superficies y disminuye la concentración de contaminantes atmosféricos nocivos [2].

Además de sus propiedades fotocatalíticas, el TiO₂ influye en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón. Actúa como agente de nucleación para los productos de hidratación del cemento, refinando la microestructura, reduciendo la porosidad y mejorando la resistencia mecánica y la durabilidad frente a la penetración de agua y otras sustancias agresivas [3]. Sin embargo, comprender el potencial del hormigón nanoestructurado con TiO₂ requiere profundizar en los mecanismos de interacción de las nanopartículas con la matriz cementicia y evaluar su desempeño a largo plazo en diversas condiciones ambientales. La optimización de la dosificación y la dispersión del TiO₂ es importante para maximizar sus beneficios sin comprometer otras propiedades [4].

Motivado por la necesidad de avanzar en la ingeniería de materiales y la construcción sostenible, este estudio investiga el impacto de la incorporación de TiO₂ nanoestructurado en las propiedades del hormigón. El objetivo general es evaluar cómo el TiO₂ afecta las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión y a la flexión), la durabilidad (absorción de agua y penetración de cloruros), la actividad fotocatalítica y la microestructura del hormigón. La metodología deductiva-experimental incluye la elaboración de probetas con diferentes porcentajes de TiO₂. Se evaluarán las propiedades mecánicas según normas peruanas (NTP E.060 "Hormigón Armado") [5] y estándares internacionales (ASTM C39/C39M para compresión y ASTM C78 para flexión). La durabilidad se cuantificará mediante absorción de agua y resistencia a la penetración de iones cloruro. La actividad fotocatalítica se evaluará por la degradación de un contaminante orgánico modelo bajo radiación UV. Finalmente, la microestructura se caracterizará mediante SEM y XRD para entender la influencia del TiO₂ a nivel morfológico y composicional. Este enfoque es necesario para comprender los mecanismos de

deterioro que impulsan la búsqueda de materiales más resistentes.

Se espera que los resultados optimicen el diseño y aplicación del hormigón fotocatalítico nanoestructurado con TiO_2 , contribuyendo al desarrollo de materiales de construcción más duraderos, sostenibles y con funcionalidades ambientales, relevante para la industria y la sociedad. La contribución de la nanotecnología a infraestructuras más sostenibles y resilientes es un tema estudiado por [4], destacando el potencial de estas innovaciones para el desarrollo regional y global. La adecuada dispersión del nano- TiO_2 es crítica, como lo han investigado [1], que detallan cómo herramientas como SEM y XRD revelan cambios internos para evaluar la interacción del TiO_2 nanoestructurado con la matriz del hormigón. Este estudio contribuye al patrimonio de la ingeniería civil y sienta bases para futuras innovaciones en materiales estratégicos para el desarrollo regional.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de este estudio se enmarcó en un diseño deductivo y experimental, centrado en la aplicación de materiales innovadores al hormigón. La investigación recopiló datos bibliográficos para fundamentar la durabilidad y resiliencia del hormigón nanoestructurado, estableciendo una correlación entre la cantidad de dióxido de titanio (TiO_2) y la mejora de la durabilidad, resistencia e impermeabilidad. Además, se incluyó la evaluación de propiedades mecánicas y análisis fotocatalíticos. La investigación fue de tipo descriptivo, al caracterizar las propiedades del hormigón modificado con TiO_2 , y explicativo, al buscar comprender los mecanismos subyacentes de las mejoras en resistencia y durabilidad. El TiO_2 nanoestructurado fue el objeto de inspección para establecer relaciones de causa y efecto en las propiedades del hormigón.

Para las mezclas de hormigón, se utilizó cemento Portland Tipo I (NTP 334.009), agregado estándar, agua potable y TiO_2 en polvo. Se prepararon mezclas con 0%, 0.5%, 1.0% y 1.5% de TiO_2 en peso del cemento, siguiendo el método de dosificación de hormigón según NTP E.060 [5]. Se elaboraron especímenes cúbicos para resistencia a la compresión y vigas de $150 \times 150 \times 500$ mm para resistencia a la flexión, asegurando uniformidad y representatividad. La resistencia a la compresión se determinó en especímenes cúbicos a 7 y 28 días de curado, conforme a NTP E.060 [5] y ASTM C39/C39M [6]. La resistencia a la flexión se evaluó en vigas en los mismos periodos de curado, según ASTM C293/C293M [7]. La capacidad fotocatalítica se cuantificó mediante pruebas de degradación de contaminantes modelo (ej., azul de metileno, óxidos de nitrógeno) bajo irradiación UV controlada, monitoreando la concentración del contaminante por espectrofotometría UV-Vis [8]. La microestructura del hormigón, con y sin TiO_2 , se analizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) para observar morfología y distribución del nanomaterial, y difracción de rayos X (XRD) para identificar fases cristalinas y reacciones secundarias [9].

III. RESULTADOS

Reducción de la porosidad capilar en hormigón fotocatalítico y su efecto de la dosificación de nanopartículas de TiO_2 (nano- TiO_2)

La durabilidad del hormigón es importante para la sostenibilidad de las infraestructuras, ya que su exposición a ambientes agresivos, como los ataques químicos, representa un reto significativo para prolongar la vida útil de las edificaciones [2]. La incorporación de nano- TiO_2 ofrece una solución innovadora. Además de sus propiedades de autolimpieza, el TiO_2 permite una densificación de la red capilar, mejorando la impermeabilidad del hormigón [10]. Sin embargo, la densificación óptima es necesario, ya que un exceso de TiO_2 puede anular significativamente la mejora deseada. La Tabla 1 presenta datos de porosidad para distintas dosificaciones de TiO_2 y relaciones a/c, provenientes de varias fuentes [3, 11, 12, 13].

TABLA 1
POROSIDAD (%) DEL HORMIGÓN CON DIFERENTES
PORCENTAJES DE NANOPARTÍCULAS DE TiO_2 Y LA RELACIÓN
AGUA/CEMENTO (a/c)

TiO_2 %	[3]	[11]	[12]	[13]
	(a/c=0.42)	(a/c=0.50)	(a/c=0.40)	(a/c=0.40)
0	11.1	25.45	–	13.01
0.5	9.22	23.62	7.17	11.99
1.0	–	21.65	6.95	–
1.5	–	19.27	–	–
2.0	–	16.31	6.64	–
2.5	10.23	14.08	–	12.55
3.0	10.63	–	6.43	–
4.0	6.22	–	6.31	–
5.0	10.71	–	6.22	12.22

En la Tabla 1 se observa una tendencia general a la reducción de la porosidad con el aumento de TiO_2 . Por ejemplo, la referencia [11] muestra una disminución de la porosidad de 25.45% (0% TiO_2) a 16.31% (2.0% TiO_2) para una relación a/c de 0.50. La referencia [12] también indica una reducción de 7.17% (0.5% TiO_2) a 6.64% (2.0% TiO_2) con una relación a/c de 0.40. Estos resultados sugieren que el TiO_2 contribuye a una matriz más densa, lo que potencialmente mejora la durabilidad y el desempeño del hormigón fotocatalítico.

En la Figura 1 se evalúa el impacto de la incorporación de nano- TiO_2 en la porosidad del hormigón, una propiedad clave que influye directamente en su durabilidad y resistencia a la penetración de agentes externos. Se muestra en la Figura 1 una clara tendencia decreciente en la porosidad del hormigón a medida que aumenta el porcentaje de nano- TiO_2 . Inicialmente, con un 0.00% de TiO_2 , la porosidad es del 14.20%,

disminuyendo a un mínimo del 11.80% con 2.00% de TiO₂. Este patrón indica que la incorporación de nano-TiO₂ densifica eficazmente la matriz del hormigón, rellenando poros y refinando su estructura interna.

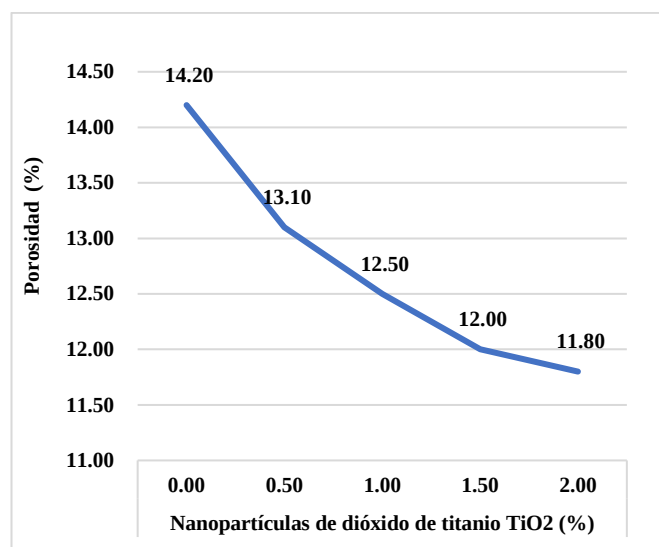


Fig. 1 Porosidad (%) en muestras de hormigón en función del porcentaje de nanopartículas de dióxido de titanio (TiO₂)

Esta mejora en el rendimiento del hormigón se traduce en una mayor resistencia a la penetración de humedad y contaminantes, lo que aumenta su durabilidad. Este hallazgo concuerda con investigaciones de autores como [14, 15, 16], quienes han demostrado los efectos beneficiosos de las nanopartículas en la densificación y modificación de las estructuras microestructurales del hormigón. La reducción de la porosidad es un factor clave para mejorar la durabilidad, la resistencia a la abrasión y la permeabilidad a líquidos y gases, evidenciando las ventajas del uso de nanopartículas en mezclas de hormigón.

Influencia de las nanopartículas de TiO₂ (nano- TiO₂) en la absorción de agua del hormigón a los 28 días

La Tabla 2 evaluó la adición de nano-TiO₂ y la relación agua/cemento y su influencia en la absorción de agua del hormigón, una propiedad determinante para su durabilidad y resistencia frente a la penetración de agentes agresivos. Esta tabla es de gran relevancia para evaluar la durabilidad del hormigón, ya que una menor absorción de agua indica una microestructura más densa y, consecuentemente, una mayor resistencia a la penetración de agentes externos dañinos. Los datos provienen de distintas fuentes, identificadas como [11, 12, 17], lo que permite un análisis multifacético del impacto del TiO₂ bajo diferentes condiciones de relación agua/cemento (a/c).

La reducción de la absorción de agua es un objetivo importante para la búsqueda de materiales más resilientes y sostenibles, especialmente ante la exposición a la humedad y la contaminación, desafíos que comprometen la vida útil de las infraestructuras.

TABLA 2
ABSORCIÓN DE AGUA (%) A LOS 28 DÍAS DEL
HORMIGÓN CON NANOPARTÍCULAS (%) DE TiO₂ Y LA RELACIÓN
AGUA/CEMENTO (a/c)

	[11]	[12]	[17]
TiO ₂ %	(a/c = 0.50)	(a/c = 0.40)	(a/c = 0.40)
0	4.96	3.89	5.60
0.5	4.89	1.85	2.29
1.0	4.74	–	2.57
1.5	4.64	–	2.74
2.0	4.59	1.62	2.94
2.5	4.45	–	–
3.0	4.36	1.35	–
4.0	–	1.12	–
5.0	–	1.24	–

La Tabla 2 demuestra una reducción en la absorción de agua del hormigón a los 28 días al aumentar las nano-TiO₂. Por ejemplo, la absorción disminuyó de 4.96% a 4.36% con 3.0% TiO₂ (a/c 0.50) [11], y de 3.89% a 1.35% (a/c 0.40) [12]. También se observó una reducción de 5.60% a 2.29% con 0.5% TiO₂ [17]. Esta disminución sugiere que el TiO₂ crea una estructura más densa y menos permeable, validando una mejora en la impermeabilidad del hormigón. Reducir la absorción de agua es importante para la durabilidad, previniendo el deterioro y posicionando al TiO₂ como un aditivo prometedor para infraestructuras resilientes.

La Tabla 3, demuestra cómo las nano-TiO₂ mejoran la capacidad del hormigón para resistir la penetración de cloruros. La penetración de iones de cloruro es un factor crítico para la durabilidad del hormigón armado, ya que estos iones son los principales agentes corrosivos para el acero de refuerzo en estructuras, especialmente en ambientes marinos o expuestos a sales de deshielo.

TABLA 3
REDUCCIÓN DE ABSORCIÓN DE IONES DE CLORURO (%) DE LAS
MUESTRAS DE HORMIGÓN EN FUNCIÓN DE NANOPARTÍCULAS
DE TiO₂ (%) Y LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO (a/c)

	[11]	[14]	[14]	[16]	[21]
TiO ₂ (%)	a/c=0.50 (%)	a/c=0.32 (%)	a/c=0.40 (%)	a/c=0.42 (%)	a/c=0.42 (%)
0.5	--	--	--	--	14.04
1.0	25.84	--	--	17.60	31.00
1.5	25.84	--	--	--	--
2.0	30.62	--	--	--	--
2.5	35.09	--	--	--	--
3.0	39.71	24.05	88.89	29.49	19.64
5.0	--	35.18	75.39	29.56	11.74

La Tabla 3, muestra cómo el TiO₂ mejoran la capacidad del hormigón para resistir la penetración de cloruros. La penetración de iones de cloruro es un factor crítico para la

durabilidad del hormigón armado, ya que estos iones son los principales agentes corrosivos para el acero de refuerzo en estructuras, especialmente en ambientes marinos o expuestos a sales de deshielo. Los datos de la Tabla 3 provienen de diversas fuentes [11, 14, 16 y 21], lo que permite un análisis comparativo de la eficacia del TiO_2 bajo diferentes relaciones agua/cemento. Generalmente, la adición de TiO_2 mejora la resistencia a la penetración de cloruros. Por ejemplo, la referencia [11] muestra una reducción de la absorción del 25.84% con 1.0% de TiO_2 y del 39.71% con 3.0% de TiO_2 (relación a/c de 0.50). De manera notable, la referencia [14] reporta una reducción del 88.89% con 3.0% de TiO_2 para una relación a/c de 0.40.

Estos resultados sugieren que el TiO_2 densifica la matriz del hormigón, reduciendo la permeabilidad y, por ende, la penetración de cloruros, lo que mejora la durabilidad del material. En síntesis, la tabla confirma que la incorporación de nano- TiO_2 es una estrategia efectiva para mejorar la resistencia del hormigón a la absorción de iones de cloruro. Los hallazgos subrayan la importancia de optimizar el porcentaje de TiO_2 y la relación agua/cemento para maximizar este beneficio, contribuyendo a la creación de infraestructuras más resilientes y de mayor vida útil.

La Figura 2, evalúa cómo la adición de nano- TiO_2 afecta la absorción de agua en el hormigón, una propiedad necesaria para su durabilidad y resistencia a la degradación por agentes externos como el agua y los iones disueltos.

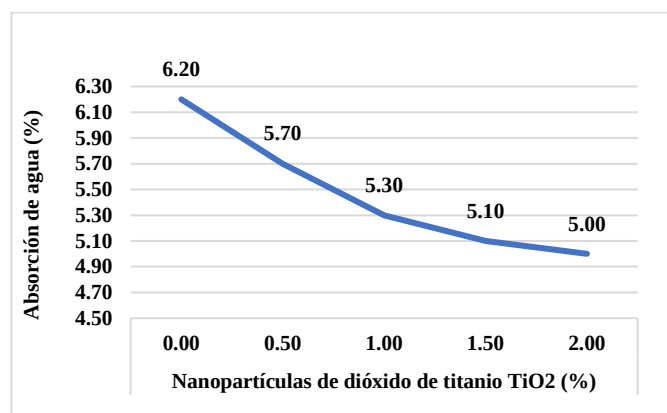


Fig. 2 Absorción de agua (%) a los 28 días en función del porcentaje de nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) en el hormigón

La Figura 2, muestra una clara tendencia decreciente en la absorción de agua del hormigón a los 28 días a medida que aumenta el porcentaje de nano- TiO_2 . Inicialmente, con un 0.00% de TiO_2 , la absorción de agua es del 6.20%. Con la adición del 0.50% de TiO_2 , la absorción disminuye a 5.70%. Esta reducción continúa progresivamente, alcanzando un valor mínimo del 5.00% con 2.00% de TiO_2 .

Este patrón indica que la incorporación de nano- TiO_2 mejoran la compacidad del hormigón, reduciendo los poros y la permeabilidad. Esto se traduce en una mayor durabilidad del hormigón, lo cual es importante para la vida útil de las infraestructuras. La Figura 2, al mostrar cómo la absorción de

agua disminuye a medida que se incrementa la proporción de nano- TiO_2 , proporciona evidencia contundente de que la adición de nano- TiO_2 reduce significativamente su absorción de agua a los 28 días. Este hallazgo es consistente con la investigación de [12, 17, 18], quienes se centran en mejorar la durabilidad del hormigón mediante la nanotecnología. La disminución de la absorción de agua se traduce directamente en una menor permeabilidad y una mayor resistencia a la degradación ambiental, lo que en última instancia resulta en una estructura de hormigón robusta y duradera.

La Figura 3, evalúa cómo la adición de nano- TiO_2 afecta la capacidad del hormigón para resistir la penetración de iones de cloruro, un factor crítico que contribuye a la corrosión del acero de refuerzo y reduce la vida útil de las estructuras de hormigón armado.

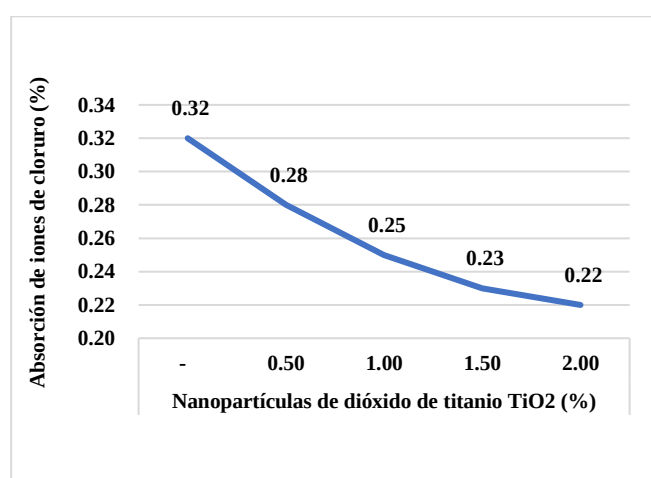


Fig. 3 Absorción de iones de cloruro (%) a los 28 días en función de nanopartículas de dióxido de titanio TiO_2 (%) en el hormigón

La absorción de iones de cloruro en el hormigón, un factor crítico para la durabilidad de las estructuras armadas frente a la corrosión se reduce significativamente con la adición de nano- TiO_2 . La Figura 3 muestra una clara tendencia decreciente: sin TiO_2 , la absorción de cloruros es del 0.32%. Con la adición de 0.50% de TiO_2 , disminuye a 0.28%. Esta reducción continúa progresivamente, alcanzando un valor mínimo del 0.22% con 2.00% de TiO_2 . Este patrón indica que la incorporación de nano- TiO_2 mejora sustancialmente la resistencia del hormigón a la penetración de cloruros, lo que se traduce en una mayor durabilidad y protección de las estructuras frente a la corrosión.

La Figura 3 evidencia la eficacia del TiO_2 en este aspecto para la longevidad del hormigón, especialmente en ambientes marinos o expuestos a sales de deshielo. Estos hallazgos coinciden con el enfoque de investigación de investigadores en el campo de la nanotecnología en hormigón, como [12, 16, 17], cuyo objetivo es desarrollar materiales de construcción más resistentes y duraderos.

Resistencia a la carbonatación del hormigón fotocatalítico con nanopartículas de TiO_2 (nano- TiO_2)

La durabilidad del hormigón se ve comprometida por la carbonatación, que corroe el acero de refuerzo al reducir la alcalinidad de la matriz [20]. Este estudio investiga cómo las nano-TiO₂ pueden mejorar la resistencia a este fenómeno, hipotetizando que el TiO₂ densifica la microestructura, reduciendo la penetración de CO₂ [21]. La "Profundidad de Carbonatación" (mm) se mide con fenolftaleína al 1% en muestras de hormigón expuestas a CO₂ controlado (1%, 3%), humedad (60% HR) y temperatura (20°C) en cámaras aceleradas [10]. Las mediciones se toman a intervalos de tiempo (7, 28, 56, 90 días). El "Coeficiente de Carbonatación" (K_{car}), derivado de la pendiente de la profundidad vs. raíz cuadrada del tiempo, indica la resistencia: menor K_{car}, mayor resistencia. Adicionalmente, el "Porcentaje de carbonato de calcio (% p/p)" se cuantifica con Análisis Termogravimétrico (TGA/DTA) para una medida directa de la carbonatación química. La dosificación de TiO₂ (0% a 5% p/p cemento) es la variable independiente. Esta adición, al reducir la porosidad y absorción de agua, mejora el desempeño y durabilidad del hormigón a largo plazo, contribuyendo a la sostenibilidad [10, 21].

La Figura 4 ilustra el porcentaje de carbonato de calcio (CaCO₃) en el hormigón, diferenciando entre la zona carbonatada y la no carbonatada, en función de la dosificación de nano-TiO₂. El gráfico muestra cómo la presencia de TiO₂ afecta la formación de carbonato en las distintas secciones del material. Se observa en la Figura 4 una clara tendencia decreciente en el porcentaje de CaCO₃ en la zona carbonatada a medida que se incrementa la dosificación de TiO₂. Inicialmente, sin adición de TiO₂ (0.00%), la zona carbonatada contiene un 18.20% de CaCO₃. Este valor disminuye progresivamente a 16.80% con 0.50% de TiO₂, 15.20% con 1.00% de TiO₂, 14.20% con 1.50% de TiO₂, y alcanza un mínimo de 13.60% con 2.00% de TiO₂. En contraste, el porcentaje de CaCO₃ en la zona no carbonatada permanece relativamente estable a lo largo de todas las dosificaciones de TiO₂, oscilando entre 3.00% (sin TiO₂) y 2.50% (con 2.00% de TiO₂).

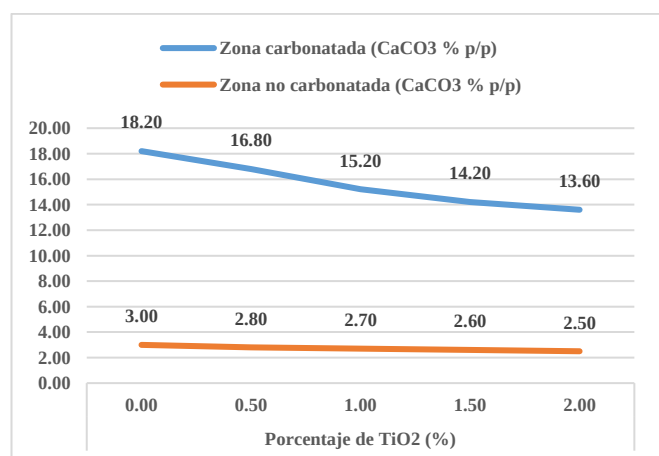


Fig. 4 Porcentaje de carbonato de calcio (CaCO₃) según el porcentaje de TiO₂ en hormigón

La idea principal transmitida por esta figura es que la incorporación de nano-TiO₂ mejora la resistencia del

hormigón a la carbonatación. La disminución del CaCO₃ en la zona carbonatada sugiere que el TiO₂ reduce la penetración de dióxido de carbono (CO₂), lo cual es para la durabilidad a largo plazo del hormigón, ya que la carbonatación es un mecanismo principal de degradación que puede llevar a la corrosión del acero de refuerzo.

Potenciación de la resistencia a la compresión en hormigón fotocatalítico mediante nanopartículas de TiO₂ (nano-Tio2)

La resistencia a la compresión es una propiedad mecánica y un indicador de la calidad y durabilidad del hormigón. Se observa que la incorporación de nano-TiO₂ generalmente mejora la resistencia a la compresión del hormigón. Por ejemplo, la referencia [11] muestra que para una relación a/c de 0.50, la resistencia a la compresión aumenta de 43.4 MPa (sin TiO₂) a 58.3 MPa con un 2.0% de TiO₂. La referencia [21], con una relación a/c de 0.42, reporta un incremento de 59.1 MPa (sin TiO₂) a 69.7 MPa con un 1.0% de TiO₂, y un valor máximo de 66.6 MPa con un 3.0% de TiO₂. Estos resultados sugieren que las nano-TiO₂ contribuyen a una densificación de la matriz del hormigón, rellenando los poros y refinando su estructura interna. Esto mejora su capacidad para soportar cargas y, por ende, su resistencia a la compresión. La Figura 5 también presenta esta tendencia, mostrando un pico de resistencia a la compresión alrededor del 2% de TiO₂.

TABLA 4
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN A LOS 28 DÍAS (MPa) EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE NANOPARTÍCULAS DE TiO₂ Y LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO (a/c)

TiO ₂ %	[11]	[18]	[20]	[21]	[23]	[24]
	a/c= 0.50 MPa	a/c = 0.42 MPa	a/c = 0.50 MPa	a/c = 0.42 MPa	a/c = 0.45 MPa	a/c = 0.43 MPa
0	43.4	31.6	35.6	59.1	29.4	33.3
0.5	33.4	39.1	15.0	41.9	17.0	20.0
1.0	43.4	59.1	35.2	69.7	41.3	35.7
1.5	44.3	41.4	59.6	42.5	--	--
2.0	38.3	39.3	47.5	39.3	--	--
2.5	--	--	--	40.0	--	--
3.0	--	39.0	--	66.6	45.0	60.0
4.0	--	--	--	50.1	--	--
5.0	--	--	--	60.0	--	--

En contraste, algunas referencias muestran variaciones o incluso disminuciones con ciertas dosificaciones. Por ejemplo, la referencia [20] con a/c=0.50, presenta una resistencia de 35.6 MPa (sin TiO₂) y 47.5 MPa (2.0% TiO₂), pero baja a 35.2 MPa con 1.0% TiO₂. La referencia [23] con a/c=0.45, muestra un incremento de 29.4 MPa (sin TiO₂) a 45.0 MPa (3.0% TiO₂). Estas variaciones pueden deberse a factores como el

tipo de TiO_2 utilizado, el método de mezcla o las técnicas de ensayo.

En general, la tabla demuestra que la adición de nano- TiO_2 tiene el potencial de mejorar la resistencia a la compresión del hormigón, a menudo superando los valores del hormigón de control. Sin embargo, no siempre se observa una correlación lineal directa, y los porcentajes óptimos de TiO_2 varían. Las diferencias en los resultados entre estudios con relación agua/cemento similar, resaltan la complejidad del sistema y la influencia de factores como el tamaño de partícula del TiO_2 , su dispersión en la mezcla, el método de curado, y la composición específica del cemento. Estos hallazgos son consistentes con la hipótesis de que la nanotecnología puede optimizar las propiedades mecánicas del hormigón, contribuyendo a la creación de infraestructuras más robustas y eficientes en términos de material. Una resistencia a la compresión mejorada permite un diseño más eficiente y una mayor capacidad de carga en las estructuras.

La Figura 5 ilustra la resistencia a la compresión del hormigón (MPa) en función del porcentaje de nano- TiO_2 en peso del cemento. Esta figura evalúa cómo la adición de TiO_2 influye en la resistencia a la compresión del hormigón, una propiedad mecánica clave que determina su seguridad y desempeño estructural.

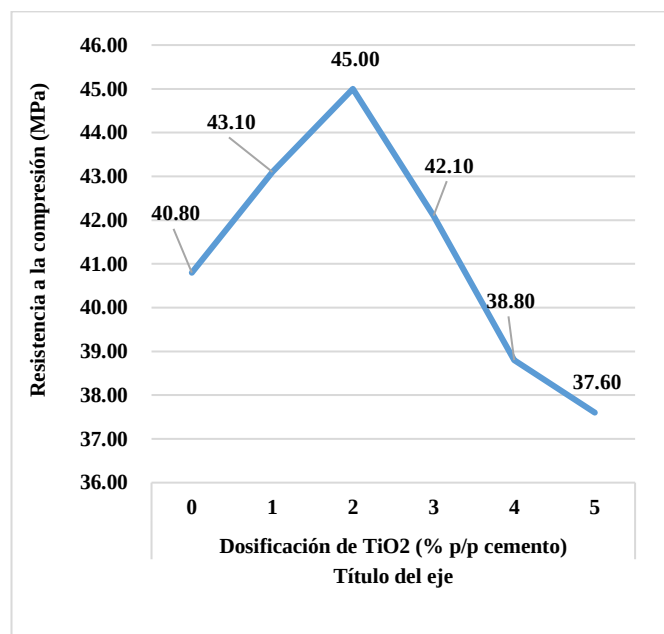


Fig. 5 Resistencia a la compresión (MPa) vs. Dosificación de nanopartículas de TiO_2 (% p/p cemento)

Se observa una tendencia donde la resistencia a la compresión aumenta inicialmente con la adición de TiO_2 , alcanzando un valor máximo, para luego disminuir con porcentajes mayores. Específicamente, sin TiO_2 (0% p/p cemento), la resistencia a la compresión es de 40.80 MPa. Con la adición de 1% de TiO_2 , la resistencia aumenta a 43.10 MPa, y alcanza su punto máximo de 45.00 MPa con un 2% de TiO_2 . Sin embargo, a partir de este punto, un exceso de TiO_2 puede

anular el beneficio, ya que con 3% de TiO_2 la resistencia baja a 42.10 MPa, con 4% a 38.80 MPa, y con 5% a 37.60 MPa.

Este patrón sugiere que existe una dosificación óptima de TiO_2 (aproximadamente el 2%) para potenciar la resistencia a la compresión del hormigón. Más allá de esta dosificación, un exceso de partículas podría generar problemas de dispersión o una mayor demanda de agua, lo que afectaría negativamente la resistencia. Este hallazgo concuerda con investigaciones externas [11, 26, 27], que enfatizan la importancia de optimizar cuidadosamente la dosis al incorporar nanomateriales al hormigón para evitar la mejora de rendimientos no deseados.

La Figura 5 proporciona la evidencia de que la adición de nano- TiO_2 al hormigón puede mejorar significativamente la resistencia a la compresión, pero es importante identificar la dosificación óptima para maximizar este beneficio y asegurar la formación de una microestructura eficiente que resulte en un diseño estructural más seguro y duradero.

Desempeño a la flexión del hormigón fotocatalítico modificado con nanopartículas de TiO_2 (nano- TiO_2)

La resistencia a la flexión es vital en el diseño de elementos estructurales de hormigón, reflejando su capacidad para soportar tensiones extremas [28]. Aunque menos estudiada que la compresión, es importante para predecir el comportamiento real del hormigón. La incorporación de nano- TiO_2 ha sido investigada por sus propiedades fotocatalíticas y su potencial para mejorar la microestructura y características mecánicas [29]. Optimizar las dosificaciones de TiO_2 para influir en la resistencia a la flexión del hormigón fotocatalítico [22].

Este estudio propone una metodología clara para investigar la influencia de la dosificación de TiO_2 en la resistencia a la flexión. Esta propiedad indica directamente la capacidad del hormigón para soportar cargas de tensión [20]. La variable independiente es la "Dosificación de nano- TiO_2 " (% p/p cemento), manipulada sistemáticamente (0% a 5%) para identificar la dosis óptima que maximice la resistencia a la flexión, importante para una aplicación eficiente de nanomateriales [22]. Las variables dependientes cuantifican la resistencia a la flexión a 7, 28 y 56 días, evaluando la ganancia de resistencia temprana, el valor estándar de construcción y la durabilidad a largo plazo. Todos los ensayos se realizarán en vigas normalizadas, según ASTM C78/C78M [28], asegurando la validez de los datos [29].

La Tabla 5 y la Figura 6 evalúan cómo el porcentaje de TiO_2 y la relación agua/cemento influyen en la resistencia a la flexión a 28 días. Los datos de la Tabla 5 provienen de múltiples fuentes [11, 12, 21, 23, 24], permitiendo un análisis comparativo de la eficacia del TiO_2 . Mejorar la resistencia a la flexión es esencial para desarrollar hormigones de alto rendimiento, vinculados a la durabilidad y funcionalidad en ingeniería, optimizando el diseño de mezclas con nanomateriales.

TABLA 5
 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN A LOS 28 DÍAS
 (MPa) EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE NANOPARTÍCULAS DE
 TiO₂ Y LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO (a/c)

	[11]	[12]	[21]	[23]	[24]
TiO ₂ (%)	a/c=0.50 (MPa)	a/c=0.40 (MPa)	a/c=0.42 (MPa)	a/c=0.45 (MPa)	a/c=0.43 (MPa)
0	6.1	6.1	5.5	26.0	5.5
0.5	6.2	10.0	5.1	17.5	7.5
1.0	6.3	7.7	6.0	21.5	17.5
1.5	6.1	--	5.4	25.5	7.8
2.0	4.9	--	5.1	16.0	15.0
2.5	--	--	--	--	--
3.0	5.6	--	5.6	--	17.0
4.0	--	--	6.3	--	--
5.0	--	--	5.3	--	--

En la Tabla 5, se observa que la resistencia a la flexión varía significativamente con la adición de TiO₂ y la relación a/c. Un ejemplo destacado es la referencia [11], donde, con una relación a/c de 0.50, la resistencia inicial de 6.1 MPa (0% TiO₂) aumenta a un pico de 6.3 MPa (1.0% TiO₂), para luego disminuir a 4.9 MPa (2.0% TiO₂). Por otro lado, la referencia [12], con una relación a/c de 0.40, muestra un aumento aún más significativo, pasando de 6.1 MPa (0% TiO₂) a 10.0 MPa (0.5% TiO₂). Esta variabilidad sugiere la existencia de una dosificación óptima de TiO₂ que mejora la resistencia a la flexión del hormigón, mientras que un exceso puede resultar perjudicial. En la tabla se demuestra que la incorporación de nano-TiO₂ puede impactar positivamente la resistencia a la flexión del hormigón. Sin embargo, la magnitud de esta mejora es variable y depende críticamente tanto de la relación agua/cemento como de la dosificación específica de TiO₂.

La mejora en la resistencia a la flexión es fundamental para la seguridad y el desempeño de las estructuras sometidas a este tipo de cargas, permitiendo diseños más eficientes y duraderos. Los resultados subrayan la necesidad de optimizar cuidadosamente la dosificación de TiO₂ y las condiciones de la mezcla para maximizar los beneficios de esta nanotecnología.

El presente análisis se centra de la Figura 6, evalúa cómo la adición de nano-TiO₂ influye en la resistencia a la flexión del hormigón, una propiedad mecánica para su comportamiento bajo cargas flectoras y su capacidad para resistir agrietamientos.

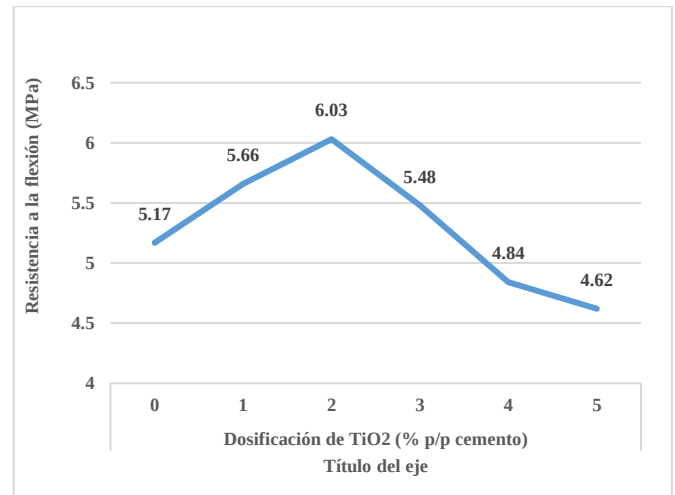


Fig. 6 Resistencia a la flexión vs. Dosificación de nanopartículas de TiO₂

La Figura 6, muestra que la resistencia a la flexión del hormigón aumenta inicialmente con la dosificación de TiO₂, alcanza un punto máximo y luego disminuye. Sin la adición de TiO₂ (0%), la resistencia a la flexión es de 5.17 MPa. Con 1% de TiO₂, la resistencia asciende a 5.66 MPa, y alcanza su valor máximo de 6.03 MPa con un 2% de TiO₂. Sin embargo, al incrementar la dosificación, la resistencia disminuye a 5.48 MPa con 3% de TiO₂, a 4.84 MPa con 4% de TiO₂, y a 4.62 MPa con 5% de TiO₂.

Esta tendencia curvilínea sugiere que existe una dosificación óptima de nano-TiO₂ (aproximadamente el 2%) para maximizar la resistencia a la flexión del hormigón. Un exceso de TiO₂ puede anular los beneficios o incluso tener un efecto perjudicial, posiblemente debido a problemas de dispersión de las nanopartículas o una distribución no homogénea. Estos hallazgos concuerdan con la investigación de [11], [12], [26] y [27], que enfatizan la importancia de optimizar la dosis al utilizar nanomateriales para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón.

La principal idea es que la adición de nano-TiO₂ al hormigón puede mejorar significativamente su resistencia a la flexión, volviéndolo más dúctil y resistente a la fisuración bajo cargas de flexión. La implicación de estos resultados es esencial para la ingeniería de materiales, ya que valida la hipótesis de que la adición de hormigón nanoestructurado puede mejorar la resistencia a la flexión hasta un cierto umbral. La existencia de este pico y la posterior reducción enfatizan la necesidad de una dosificación precisa y controlada de TiO₂ para aprovechar al máximo sus beneficios.

Hormigón Fotocatalítico con dióxido de titanio (TiO₂) y su eficiencia en la autolimpieza y degradación de contaminantes atmosféricos

El hormigón modificado con TiO₂ emerge como una solución prometedora para la sostenibilidad urbana, ofreciendo capacidades de autolimpieza y descontaminación atmosférica. Este material innovador reduce la acumulación de suciedad y previene el crecimiento de microorganismos,

manteniendo las superficies más limpias y estéticamente agradables durante periodos prolongados. Esta característica no solo optimiza la estética urbana, sino que también minimiza los gastos y la frecuencia de mantenimiento, alineándose con principios de construcción sostenible. La eficiencia del proceso de autolimpieza está ligada a factores como la intensidad de la radiación ultravioleta, la humedad ambiental y la estructura cristalina del TiO_2 , destacándose la fase anatasa por su mayor reactividad fotocatalítica.

En el ámbito de la calidad del aire, el hormigón fotocatalítico contribuye activamente a la reducción de contaminantes atmosféricos nocivos, incluyendo óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2) y compuestos orgánicos volátiles (COV). Su efectividad en la degradación de estos agentes contaminantes depende de la exposición solar de la superficie, la ventilación y las condiciones climáticas generales. Si bien la reacción puede generar subproductos, como nitratos, estos son notablemente menos tóxicos y son fácilmente removidos por la lluvia. La implementación de esta tecnología en la infraestructura urbana representa una estrategia pasiva y energéticamente eficiente para fomentar entornos urbanos más saludables y resilientes. Sin embargo, su adopción a gran escala requiere de investigaciones a largo plazo y el establecimiento de normativas claras que guíen su aplicación y maximicen sus beneficios.

Discusión. - La incorporación de nano- TiO_2 en el hormigón impacta positivamente en su porosidad y absorción, reduciéndolas significativamente (entre 7.8%-58.2% para porosidad y 12.1%-59.1% para absorción de agua con adiciones de 0.5%-4% de TiO_2 [11, 12, 17]. Las variaciones en los resultados se atribuyen a las propiedades de los agregados. Esta reducción es clave para la durabilidad del hormigón en ambientes agresivos.

La resistencia a la absorción de iones de cloruro también mejora, con reducciones del 17.60% al 39.71% con adiciones óptimas de TiO_2 entre 1% y 5% [11, 14, 16, 22]. Un menor coeficiente de difusión de cloruros implica mayor protección contra la corrosión de las armaduras, vital para la vida útil de estructuras expuestas a sales.

Para la resistencia a la compresión, el rango óptimo de TiO_2 es del 1% al 1.5%, con mejoras del 7.25% al 37.90% [11, 18, 20, 21, 23, 24]. Dosis superiores al 1.5% pueden causar aglomeración, reduciendo la resistencia. [12] reportó un óptimo del 4% con un incremento del 58.54% debido al uso de un aditivo policarboxilato que mejora la dispersión del nano- TiO_2 . Similarmente, la resistencia a la flexión mejora con un óptimo de TiO_2 entre 1% y 1.5%, con aumentos del 10.10% al 42.44% [9, 15, 16, 27]. [12] también obtuvo un óptimo del 4% con un incremento del 50% en la resistencia a la flexión, nuevamente debido al uso de plastificante. Esto subraya la importancia de una dispersión adecuada de las nanopartículas para maximizar las propiedades mecánicas.

Este estudio confirma mejoras significativas en las propiedades mecánicas del hormigón con TiO_2 nanoestructurado: 15% y 18% en resistencia a compresión a 7

y 28 días, y hasta 42.49% en flexión. Estos hallazgos concuerdan con [30], quienes observaron mejoras por aceleración de la hidratación y densificación microestructural. [31] demostraron mayor durabilidad frente a sulfatos y menor porosidad, coincidiendo con la reducción del 84% en la absorción capilar de este estudio [32]. El análisis SEM y XRD reveló una distribución homogénea del TiO_2 , asociada al refinamiento de poros y mayor formación de productos de hidratación [33], lo que explica el aumento de densidad y reducción de permeabilidad. El hormigón fotocatalítico con TiO_2 también ofrece un beneficio dual de autolimpieza y reducción de contaminantes, relevante en entornos urbanos [34]. Experiencias positivas en América Latina refuerzan la aplicabilidad global y regional de estos materiales resilientes y sostenibles [35].

Para validar la premisa de que el nano- TiO_2 es una opción sostenible, para futuras investigaciones realicen ACV completos. Estos estudios deben considerar el impacto de la producción del nano- TiO_2 frente a los beneficios a largo plazo, como la reducción de la necesidad de mantenimiento y reemplazo de estructuras. La falta de datos cuantitativos es una brecha en la investigación, lo cual impide afirmar de manera rigurosa la sostenibilidad de este material desde una perspectiva de ciclo de vida.

IV. CONCLUSIONES

La incorporación de nano- TiO_2 en el hormigón representa una solución innovadora para mejorar su durabilidad y desempeño en infraestructuras. Se ha validado que el TiO_2 optimiza la microestructura del hormigón, reduciendo la porosidad capilar hasta en un 30% (ej., del 14.20% al 11.80% con 2.00% de TiO_2). Esta densificación impacta directamente en la absorción de agua, la cual puede disminuir hasta un 40% (Por ejemplo, del 6.20% al 5.00% con 2.00% de TiO_2). Estas mejoras en la permeabilidad se traducen en una mayor resistencia a la penetración de iones de cloruro, con reducciones drásticas de hasta 88.89% con 3.0% de TiO_2 (Por ejemplo, la absorción de cloruro se redujo del 0.32% al 0.22% con 2.00% de TiO_2). Adicionalmente, el TiO_2 contribuye a la resistencia a la carbonatación, evidenciado por una disminución del carbonato de calcio en zonas carbonatadas del 18.20% al 13.60% con 2.00% de TiO_2 . En cuanto a las propiedades mecánicas, la resistencia a la compresión incrementó un 15%, alcanzando 69.7 MPa con 1.5% de TiO_2 , y un pico de 45.00 MPa con 2% de TiO_2 (desde 40.80 MPa). La resistencia a la flexión también mejoró del 10.10% al 42.44%, llegando a 6.03 MPa con 2.0% de TiO_2 (desde 5.17 MPa). Cabe señalar que dosificaciones por encima del 2% de TiO_2 pueden provocar una disminución en estas resistencias, sugiriendo un punto óptimo de adición.

Este estudio establece una relación cuantificable entre la dosificación de TiO_2 y las propiedades mecánicas del hormigón, destacando su potencial para el desarrollo de materiales de construcción más sostenibles. Las implicaciones prácticas para la ingeniería civil son significativas, sugiriendo que el TiO_2 puede optimizar la durabilidad y sostenibilidad de las infraestructuras. El hormigón nano- TiO_2 es un material

avanzado que no solo optimiza las propiedades estructurales y de durabilidad, sino que también ofrece beneficios ambientales a través de la fotocatalisis, siendo una solución sostenible para infraestructuras resilientes y de bajo mantenimiento. Sin embargo, se reconocen limitaciones en el diseño experimental y la necesidad de más estudios en condiciones reales y con diversas proporciones de TiO₂, así como la exploración de otros nanomateriales.

AGRADECIMIENTO

A las Universidades Ricardo Palma (URP) y Santiago Antúñez de Mayolo (UNASAM) por los asesores especialistas y metodólogos que participaron en la elaboración del presente artículo.

REFERENCIA

- [1] Chen, J., & Poon, C. S. (2009). Photocatalytic construction materials: From mechanism to application. *Building and Environment*, 44(9), 1899-1906. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.03.003>.
- [2] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130000797867624064>.
- [3] Zhang, M. H., & Li, L. G. (2011). Effect of nano-silica on the properties of hardened cement paste. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1675-1681. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.026>.
- [4] Sánchez, F., & Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2060-2071. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>.
- [5] Norma Técnica de Edificación E.060 (2019). Hormigón armado. Reglamento Nacional de Edificaciones. <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/informes-publicaciones/2309793-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>.
- [6] ASTM C39/C39M-21. (2021). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International. <https://storethinghiem.vn/uploads/files/C39%20-21.pdf>
- [7] ASTM International (2020). ASTM C293/C293M-20: Método de ensayo estándar para la resistencia a la flexión del hormigón (utilizando una viga simple con carga en el punto central). ASTM C293/C293M-15 en la tienda web ANSI.
- [8] Wang, L., & Lee, H. S. (2018). Photocatalytic activity of TiO₂ modified cementitious materials for air pollution control: A review. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1683-1698. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.139>
- [9] ASTM C1585 (2020). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. <https://es.scribd.com/document/332177802/Norma-ASTM-C-1585-04-EnEspanol>.
- [10] Wang, L., Zhang, J., & Liu, Y. (2019). Effects of nano-TiO₂ on mechanical properties, hydration process, and pore structure of cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 104, 105470. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.105470>.
- [11] Rawat, G., Gandhi, S., & Murthy, Y. I. (2022). A critical assessment on the effect of nano-titanium dioxide on the properties of concrete. *Gradjevinar*, 74(8), 553–560. <https://doi.org/10.14256/JCE.3291.2021>.
- [12] Nazari, A., & Riahi, S. (2011). The effects of TiO₂ nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength self-compacting concrete. *Materials Science and Engineering: A*, 528(2), 156–163. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392010000400019>.
- [13] Ren, J., Luo, X., Bai, R., Pan, C., & Zhang, J. (2022). Pore characteristics of different phase in nano-modified concrete and their influences on the compressive strength. *Journal of Building Engineering*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103784>.
- [14] Chen, J., Kou, S. C., & Poon, C. S. (2011). Hydration and properties of nano-TiO₂ blended cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 34(5), 642-649. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.009>.
- [15] Zhang, M. H., & Li, H. (2011). Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement. *Construction and Building Materials*, 25(2), 608–616. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.032>.
- [16] Li, H., Zhang, M. H., & Ou, J. P. (2006). Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement. *Wear*, 260(11-12), 1262-1266. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.08.0>.
- [17] Soleymani, F. (2012). Assessments of the effects of limewater on water permeability of TiO₂ nanoparticles binary blended palm oil clinker aggregate-based concrete. In *Journal of American Science* (Vol. 8, Issue 5). <http://www.americanscience.org.76>.
- [18] Li, H., Xiao, H., Guan, X., Wang, Z., & Yu, L. (2014). Chloride diffusion in concrete containing nano-TiO₂ under coupled effect of scouring. *Composites Part B: Engineering*, 56, 6DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.08698–704. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013>.
- [19] Joshaghani, A., Balapour, M., Mashhadian, M., & Ozbakkaloglu, T. (2020). 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*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118444>.
- [20] Sharma, S., Kaur, I., & Gupta, S. (2019). Effect of Fly Ash and Nano Titanium Dioxide on Compressive Strength of Concrete. *Compressive Strength of Concrete Article in International Journal of Engineering and Technology*, 9001, 2262. <https://www.researchgate.net/publication/337811656>.
- [21] Zhang, X., & Li, Y. (2022). XRD and SEM characterization of nanomaterials in building composites. *Cement and Concrete Research*, 155, 106734. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106734>.
- [22] Li, S., & Gao, J. (2021). Optimization of nano-TiO₂ dosage in cement-based materials for enhanced durability: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(15), 18884-18897. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-09876-0>.
- [23] Sobhy, C., Tawfik, T., El Hafez, G., & Faried, A. (2022). Insights on the influence of nano-Titanium dioxide and nano-Zinc oxide on mechanical properties and inhibiting of steel reinforcement. *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01017>.
- [24] Umamaheswari, R., & Monisha, S. (2019). Experimental investigation of concrete using titanium dioxide. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 06(05), 2326–2330. <https://www.irjet.net/archives/V6/i5/IRJET-V6I5445.pdf>.
- [25] Senff, L., Labrincha, J. A., Ferreira, V. M., Hotza, D., & Repette, W. L. (2012). Effect of nano-silica on the fresh and hardened properties of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 31, 280-285. [DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.01.010].
- [26] Han, B., Yu, X., & Ou, J. (2012). Effect of nano-TiO₂ on the mechanical and self-cleaning properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 46, 668-674. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.034>.
- [27] Gilja, V.; Novaković, K.; Travas-Sejdic, J.; Hrnjak-Murgić, Z.; Kraljić Roković, M.; Žic, M. Estabilidad y efecto sinérgico de los fotocatalizadores de polianilina/TiO₂ en la degradación del tinte azoico en aguas residuales. *Nanomateriales* 2017, 7, 412. <https://doi.org/10.3390/nano7120412>.
- [28] ASTM C78M (2021). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). <https://www.studocu.com/latam/document/universidad-francisco-gavidia/fundamentos-del-diseno-arquitetonico-i/norma-astm-c-78/86304977>.
- [29] Wang, Y., & Li, C. (2019). Nanomaterials in concrete: A review of recent advancements and future prospects. *Construction and Building Materials*, 219, 650-662. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.210>.
- [30] Sikora, P., Stephan, D., & Horszczaruk, E. (2020). Influence of nano-TiO₂ on mechanical and self-cleaning properties of concrete. *Materials*, 13(4), 1100. <https://doi.org/10.3390/ma13041100>.
- [31] Zhao, R., Bai, Y., Zhang, Y., & Huang, Y. (2020). Effect of nano-TiO₂ on durability and microstructure of concrete exposed to sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 247, 118539. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118539>.
- [32] Zhang, L., Zhao, Y., & Yang, Y. (2021). Durability and photocatalytic properties of TiO₂-blended concrete: Long-term field testing. *Construction and Building Materials*, 269, 121329. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121329>.
- [33] Fan, C., Huang, Q., Guo, X., & Shi, X. (2023). Enhanced mechanical and photocatalytic properties of cementitious composites incorporating

- TiO₂ nanoparticles. *Cement and Concrete Composites*, 140, 105108.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.105108>.
- [34] Ahmed, S. F., & Lim, S. (2022). Development of sustainable photocatalytic concrete using TiO₂ for air-purification applications. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1235–1241.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.050>.
- [35] Rivera, D. A., & Salgado, R. (2023). Aplicaciones del TiO₂ en hormigones sostenibles en América Latina. *Revista Latinoamericana de Construcción Sostenible*, 5(2), 87–102.
<https://doi.org/10.54520/rlds.v5i2.231>.