

Rigid pavement design with use of titanium nanoparticles to improve the strength of concrete-2024

Angie Fiorella Repoma Souza¹; Patrick Reynaldo Muguruza Flores²

^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U19101387@utp.edu.pe, U18302139@utp.edu.pe

Abstract— The report presented is a research project whose main purpose is to develop a rigid pavement using titanium nanoparticles in order to increase the compressive strength of concrete in the Av. José Saco Rojas, located in the district of Carabayllo, Peru. It seeks to solve the premature wear of pavements caused by the increase in vehicular flow and the low resistance of concrete to compression. The main objective is to determine how the use of titanium nanoparticles improves the strength of concrete. Experimental tests were carried out with concrete molds containing various proportions of titanium nanoparticles (0%, 3%, 5%, 7%, y 12%). Mechanical attributes such as compressive strength and physical properties of aggregates were analyzed. Nanoscopic titanium particles increase mechanical strength and enhance features such as floor impermeability. A dosage of 7% is considered to be ideal for rigid pavement projects. This design is feasible to reduce costs and extend the useful life of the pavement. The project highlights the importance of nanomaterials in civil engineering as an option to improve road infrastructure, adjusting to the demands of transport and urban development in Carabayllo.

Keywords: rigid, nanoparticles, titanium, strength, compression

Diseño de pavimento rígido con uso de nanopartículas de titanio para mejorar la resistencia del concreto-2024

Angie Fiorella Repoma Souza¹; Patrick Reynaldo Muguruza Flores²

^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U19101387@utp.edu.pe, U18302139@utp.edu.pe

Resumen—En el presente artículo se estudia el desarrollo de un pavimento rígido empleando nanopartículas de dióxido de titanio, con el propósito de mejorar la resistencia a la compresión del hormigón en la Av. José Saco Rojas, situada en el distrito de Carabayllo, Perú. El estudio busca dar solución al desgaste prematuro de los pavimentos causado por el aumento del flujo vehicular y la baja resistencia del concreto. Se llevaron a cabo pruebas experimentales utilizando moldes de hormigón con diferentes proporciones de nanopartículas de dióxido de titanio (0%, 3%, 5%, 7% y 12%), evaluando propiedades mecánicas, como la resistencia a la compresión, y características físicas de los agregados. Los resultados mostraron que las nanopartículas mejoran significativamente la resistencia del hormigón y potencian propiedades como la impermeabilidad. Se concluyó que una dosificación del 7% es óptima para proyectos de pavimentos rígidos, al ofrecer mayor durabilidad y reducción de costos. El artículo destaca el potencial de los nanomateriales en la ingeniería civil como una solución innovadora para mejorar la infraestructura vial, ajustándose a las necesidades del transporte y el desarrollo urbano en Carabayllo.

Palabras clave—Pavimento rígido, nanopartículas, titanio, resistencia, compresión.

I. INTRODUCCIÓN

En el contexto peruano, el sistema de transporte constituye un componente clave para el desarrollo económico, al facilitar el intercambio comercial tanto a escala nacional como internacional. La eficiencia de dicho sistema depende, en gran medida, de la existencia de infraestructuras viales en condiciones óptimas, que aseguren una circulación continua y segura. En este sentido, los pavimentos adquieren un rol esencial. Particularmente, en infraestructuras estratégicas como aeropuertos, túneles y puentes, se emplean pavimentos especializados cuya formulación incorpora mejoras en propiedades mecánicas del concreto, tales como la ductilidad y la resistencia a la fatiga por impacto, a fin de garantizar un desempeño adecuado frente a demandas estructurales más exigentes. [1].

El aumento sostenido en la demanda de transporte de carga y de pasajeros exige una infraestructura más extensa y eficiente, capaz de mitigar las externalidades negativas asociadas a la congestión vehicular. En este contexto, la mejora de la infraestructura de transporte se vuelve esencial, ya que esta no solo cumple una función logística, sino que también constituye un soporte fundamental para múltiples sectores económicos que dependen directamente de su operatividad y eficiencia. [2]. De

acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), en noviembre de 2023 se registró un incremento del 1,7 % en el flujo de vehículos ligeros y pesados en comparación con el mismo período del año anterior [3], según el Índice Nacional de Flujo Vehicular, este crecimiento anual en el parque automotor pone de manifiesto la necesidad de optimizar el diseño del pavimento rígido. Este tipo de pavimento tiene como función principal la adecuada transferencia de las cargas inducidas en la losa de concreto hacia las capas subyacentes de la estructura, garantizando así su desempeño mecánico y durabilidad frente al aumento en las demandas del tránsito vehicular [4].

La mejora en el diseño de pavimentos rígidos aporta beneficios significativos tanto al parque vehicular como a la sociedad en general, al incrementar la resistencia estructural, disminuir la formación de fisuras y reducir el deterioro prematuro de la superficie. Estas mejoras contribuyen directamente a una mayor fluidez en el tránsito vehicular y a una operación más eficiente del transporte comercial [5]. Las nanopartículas, debido a su elevada energía libre superficial, tienen la capacidad de formar estructuras porosas densas a través de procesos de interconexión y estrechamiento. No obstante, la presencia de poros en la microestructura resultante tras la sinterización — producto de las condiciones térmicas y de presión aplicadas durante el procesamiento — introduce incertidumbre en cuanto al comportamiento mecánico del material [6]. En particular, el dióxido de titanio (TiO_2) se distingue en aplicaciones con concreto por sus propiedades fotocatalíticas, que le permiten catalizar la degradación de contaminantes presentes en el ambiente, transformándolos en compuestos inofensivos como oxígeno, agua, dióxido de carbono, nitratos y sulfatos. [7]. Además, el TiO_2 es un semiconductor que presenta alta resistencia y una estructura cristalina distintiva. Diversos estudios han abordado el análisis del desempeño a corto plazo del hormigón fotocatalítico basado en TiO_2 ; no obstante, la información disponible respecto a su comportamiento a largo plazo es limitada. Esta brecha resulta especialmente significativa, dado que la vida útil estimada de los pavimentos se sitúa entre los 10 y 15 años, e incluso puede ser superior en el caso de edificaciones, lo que resalta la importancia de investigar su durabilidad bajo condiciones reales de servicio [8]. Diversos estudios han evidenciado que la incorporación de TiO_2 en la mezcla del pavimento contribuye a mejorar su resistencia frente a agentes ambientales, tales como la lluvia y los efectos de la escorrentía superficial [9].

Debido a su reducida escala nanométrica, actúa como un sitio de nucleación dentro de la matriz del cemento, favoreciendo el desarrollo temprano de la rigidez y mejorando la durabilidad del material a lo largo del tiempo [10]. Sin embargo, un aumento excesivo en la proporción de TiO_2 , en un rango del 0 % al 8 %, puede provocar una disminución en la resistencia a la compresión del concreto, debido a su interferencia en el proceso de hidratación del cemento y en el desarrollo adecuado de sus propiedades mecánicas [11].

La presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de las nanopartículas de dióxido de titanio en el diseño de pavimentos rígidos, con el fin de mejorar la resistencia a la compresión del concreto. Entre sus objetivos específicos se encuentran la caracterización de dichas nanopartículas a través de ensayos preliminares, la determinación de su dosificación óptima y el análisis de su influencia en la estructura del pavimento. Los nanomateriales ofrecen ventajas sustanciales frente al concreto convencional, entre las que destacan una mayor resistencia mecánica, mayor ductilidad, mejor capacidad de absorción de energía, una microestructura más compacta y una durabilidad superior, que incluye propiedades auto compensadoras o de autocuración [12].

II. METODOLOGIA

El proceso experimental se inició con la caracterización de los agregados mediante ensayos granulométricos destinados a determinar sus propiedades físicas, en conformidad con normas técnicas como ASTM C-566 (determinación del contenido de humedad), ASTM C-136 (análisis granulométrico), ASTM C-127 (peso específico del agregado grueso) y ASTM C-128 (peso específico del agregado fino). Estas pruebas aseguraron la calidad y homogeneidad de los materiales empleados en la elaboración del concreto. Asimismo, para evaluar el módulo de elasticidad del concreto, se llevaron a cabo ensayos de compresión y tracción en laboratorio, dado que dicho parámetro es fundamental en el diseño estructural, al influir directamente en la respuesta mecánica del material frente a cargas aplicadas [13].

El diseño de mezcla y el cálculo de las dosificaciones se realizaron con base en las directrices establecidas por la guía técnica de la Cámara Peruana de la Construcción (CAPECO). Se elaboraron cinco mezclas con diferentes concentraciones de nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2), determinadas en función del volumen de cemento. Cada mezcla fue representada por tres probetas, correspondientes a los siguientes porcentajes de TiO_2 : 0 %, 3 %, 5 %, 7 % y 12 %. Las mezclas fueron preparadas, vertidas en moldes y desencofradas transcurridas 24 horas. Posteriormente, se sometieron a un proceso de curado en agua bajo condiciones controladas durante periodos de 7, 14 y 28 días, a fin de asegurar una adecuada hidratación del cemento. Al finalizar cada etapa de curado, se realizaron ensayos de compresión para determinar la resistencia mecánica desarrollada. Considerando que la resistencia a la tracción

constituye una propiedad crítica en el diseño del concreto, también se efectuaron ensayos específicos para su medición [14]. Esta propiedad adquiere especial relevancia debido al comportamiento frágil del concreto bajo esfuerzos de tracción, dado que representa entre el 7 % y el 15 % de su resistencia a la compresión. Omitir su evaluación podría comprometer tanto la capacidad de servicio como la durabilidad estructural del material [15].

Investigaciones previas han evidenciado que el uso de nanomateriales puede mejorar significativamente la microestructura y la impermeabilidad del concreto. En particular, aunque el dióxido de titanio (TiO_2) ha sido escasamente explorado en aplicaciones cementicias, sus nanopartículas, debido a su tamaño extremadamente reducido, presentan la capacidad de ocupar los espacios vacíos dentro de la pasta de cemento, generando un efecto de relleno que refuerza la matriz cementante y favorece la formación de una estructura más compacta [16]. Además, el TiO_2 actúa como un semiconductor de alta resistencia con propiedades fotocatalíticas, lo que le confiere beneficios medioambientales relevantes. Su estructura cristalina le proporciona estabilidad térmica, lo cual puede influir positivamente en la absorción de calor y en la durabilidad del concreto expuesto a condiciones exigentes [17,18]. Para esta investigación, los resultados obtenidos de las mezclas con TiO_2 fueron comparados con una mezcla de referencia sin adición de nanopartículas, con el propósito de evaluar la variación en la resistencia a la compresión y determinar el impacto de su incorporación en las propiedades mecánicas del concreto. Todo el procedimiento experimental se desarrolló bajo condiciones controladas, asegurando la validez y reproducibilidad de los datos obtenidos [19].

Mediante difracción de rayos X (XRD) para el diseño experimental, los análisis realizados muestran que, tras el proceso de calcinación a 500 °C durante 30 minutos, se observa una disminución significativa en la intensidad de los picos de las muestras, en comparación con los del precursor TiO_2 P-25 (Figura 1). La difracción de rayos X en materiales con estructura cristalina se produce de manera ordenada al incidir sobre planos intersticiales específicos, lo que genera picos de alta intensidad [20].

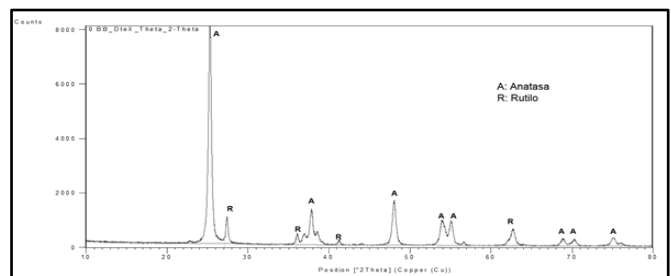


Fig. 1 Análisis XRD del TiO_2

III. RESULTADOS

Se exponen los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología propuesta, con el objetivo de verificar si los valores alcanzados satisfacen o superan los criterios establecidos para mejorar la resistencia del pavimento rígido en la Av. José Saco Rojas, mediante la incorporación de nanopartículas de dióxido de titanio (TiO₂ P25). En el contexto del desarrollo de proyectos de infraestructura, es esencial realizar una evaluación rigurosa y una selección adecuada de los materiales de construcción, asegurando que estos cumplan con las especificaciones técnicas y normativas vigentes para su correcta implementación.

Se llevaron a cabo ensayos de laboratorio para evaluar las propiedades físicas de los agregados grueso y fino, con el fin de asegurar la calidad del material utilizado en la mezcla. Las nanopartículas de dióxido de titanio pueden presentarse en forma pulverizada o líquida. Debido a su tamaño extremadamente pequeño, estas partículas son capaces de llenar los espacios vacíos entre las partículas de cemento, produciendo un "efecto de relleno" más eficiente. Este fenómeno contribuye a la formación de una matriz de unión más compacta, lo que mejora significativamente las propiedades mecánicas del concreto[21].

A. Propiedades físicas de los agregados

Se pesó 500g para realizar el ensayo granulométrico obteniendo un módulo de finura de 2.92% cumpliendo con los parámetros requerido por el ASTM C33 que el módulo de finura tiene que estar en el rango de (2.3-3.1). Además, se recolectó una cantidad de agregado fino para realizar un cuarteo y humedecer luego introducir al horno un espécimen a la temperatura de 110°C ± 5°C para obtener el porcentaje de humedad 1.7% y absorción 1.02 %. A continuación, se muestran en la Tabla I, Tabla II y Fig. 2, los resultados obtenidos del agregado fino.

TABLA I
ENSAYO GRANULOMETRICO DEL AGREGADO FINO

Ensayo granulométrico del agregado fino						
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Masa retenida en cada tamiz	Masa acumulada retenida en	%Finos (pasante)	%retenido	%retenido acumulado
#3/8	9.5	0	0	100	0	0
#4	4.75	18	18	96.38	3.62	3.62
#8	2	78	96	80.68	19.32	19.32
#16	1.18	102	198	60.16	20.52	39.84
#30	0.6	104	302	39.24	20.93	60.77
#50	0.3	84	386	22.33	16.9	77.67
#100	0.15	64	450	9.46	12.88	90.54
#200	0.08	28	478	3.82	5.63	96.18
Fondo	0	19	497	0	3.82	100
Total		497			100	

Modulo de finura: 2.92

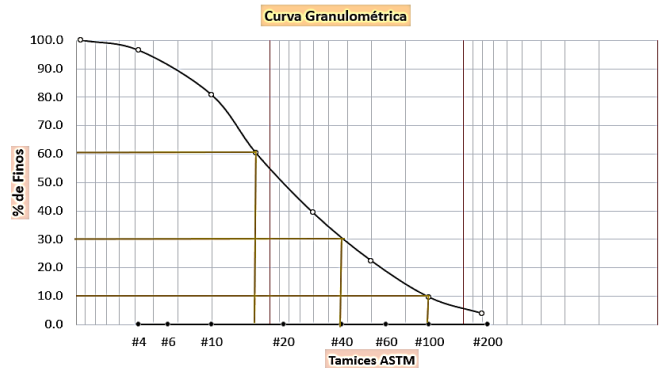


Fig. 2 Curva granulométrica

TABLA II
RESUMEN DE LAS PROPIEDADES FISICAS DEL AGREGADO FINO

Propiedades físicas del agregado fino		
Descripción	Cantidad	Unidad
Porcentaje de humedad	1.7	%
Porcentaje de absorción	1.02	%
Modulo de finesa	2.9	%
Peso especifico seco	2.61	grs/cm3

B. Ensayo granulométrico del agregado grueso

Se pesó 500g de agregado grueso para realizar el ensayo granulométrico, dando como resultados un tamaño máximo nominal de 1" y un tamaño máximo de 1 1/2". además, se recolectó una cantidad de agregado grueso para realizar un cuarteo y humedecer luego introducir al horno un espécimen a la temperatura de 110°C ± 5°C para obtener el porcentaje de humedad 0.8% y absorción 2.01 %. A continuación, se muestran en la Tabla II y la Tabla III, los resultados obtenidos del agregado grueso.

TABLA III
ENSAYO GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO

Ensayo granulométrico del agregado grueso						
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Masa retenida en cada	Masa acumulada	%Grueso (pasante)	%retenido	%retenido acumulado
1 1/2"	37.5	0	0	100	0	0
1"	25	28.4	18	96.38	3.62	3.62
3/4"	19	130.2	96	80.68	15.69	19.32
1/2"	12.5	242.1	198	60.16	20.52	39.84
3/8"	9.5	54	302	39.24	20.93	60.77
4"	4.75	34.6	386	22.33	16.9	77.67
Fondo	0	3	492.3	0	0.609	100
Total		492.3			100	

Tamaño max nominal: 1"
Tamaño max : 1 1/2"

TABLA IV
RESUMEN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGREGADO GRUESO

Propiedades físicas del agregado grueso		
Descripción	Cantidad	Unidad
Porcentaje de humedad	0.8	%
Porcentaje de absorción	2.01	%
Tamaño máximo nominal	1	"
Peso específico seco	2.51	grs/cm3

C. Diseño de mezcla para 1m³

Inicialmente, para el diseño de la mezcla se utilizará como referencia la Tabla de proporciones de CAPECO, en función de los resultados obtenidos en el análisis granulométrico, como se muestra en la Tabla V, con un tamaño máximo de agregado de ½" y un módulo de fineza entre 2.4 y 3. El objetivo del diseño es alcanzar una resistencia de $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, garantizando la fabricación de un concreto adecuado y resistente para su aplicación en pavimento rígido.

TABLA V
CANTIDAD DE MATERIAL POR m³

Cantidad de material por m3 para F'c=210 kg/cm2				
Materiales	Cemento	Arena	Piedra	Agua
Peso (kg)	9.73	0.52	0.53	0.186

D. Diseño de mezcla para 15 probetas con nanopartícula de titanio

Las medidas de las probetas es 20cm x 10cm con un volumen de 0.00157 m³ para los cálculos se multiplico la cantidad de cada material que está en la tabla anterior por el volumen de la probeta y la cantidad de probetas por un factor de desperdicios 5%. dando como resultado la Tabla VI. Según la Tabla VII, se calculó la cantidad de (nanoTiO₂) para los ensayos. Para obtener las cantidades de las nanopartículas de titanio, en función a los porcentajes propuestos, serán obtenidos en relación con el volumen total del cemento que es 0.649 kg.

TABLA VI
CANTIDAD DE MATERIALES PARA 15 PROBETAS

Cantidad de material para la mezcla de 15 probetas (F'c=210 kg/cm2)				
Materiales	Cemento	Arena	Piedra	Agua
Peso (kg)	9.74	21.37	19.97	4.38

TABLA VII
CANTIDAD DE NANOMATERIAL

Cantidad de nanopartículas de titanio (TiO2P25)					
Porcentaje	0%	3%	5%	7%	12%
TiO2 (gr)	0	58.43	97.38	136.33	272.67

Para realizar la mezcla, se utilizó un trompo de 1.14 hp eléctrico vaciando los materiales poco a poco hasta llegar a una mezcla homogénea con su porcentaje de TiO₂ correspondientes a la tabla VII. Al realizar el vaciado a la probeta se varillo 25 veces en 2 capas simulando un vibrado de concreto y con la ayuda de un martillo de goma.

E. Resistencia a la compresión

Una vez completado el proceso de curado de las probetas a los 7, 14 y 28 días, se procede a realizar el ensayo de compresión. Durante este ensayo, se determina la carga máxima soportada por cada probeta, considerando un área de 78.5 cm². Finalmente, se calculan las resistencias a la compresión correspondientes para cada periodo de fraguado.

Resistencia a la compresión con nanoTiO₂ en 7 días

Para este ensayo de rotura, se introduce la probeta a la máquina de compresión dando como resultados lo siguiente:

Se observa en la Figura N°3 que la probeta N°4 tiene un aumento de resistencia a la compresión dando como resultado 769.52 kg/cm² con un 7% de nano TiO₂. Por otro lado, la menor resistencia a la compresión es la PROBETA N°1 resultando 123.17 kg/cm², siendo este la que no tiene la adherencia del TiO-P25.

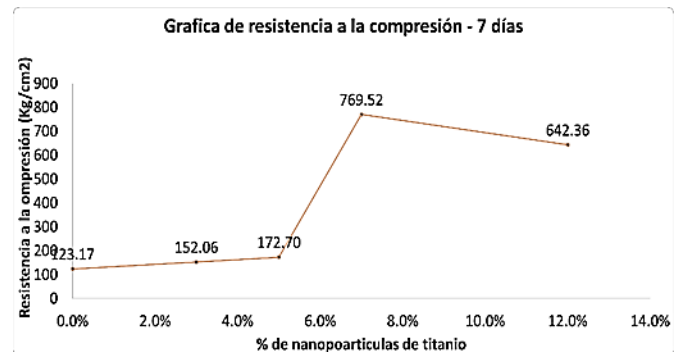


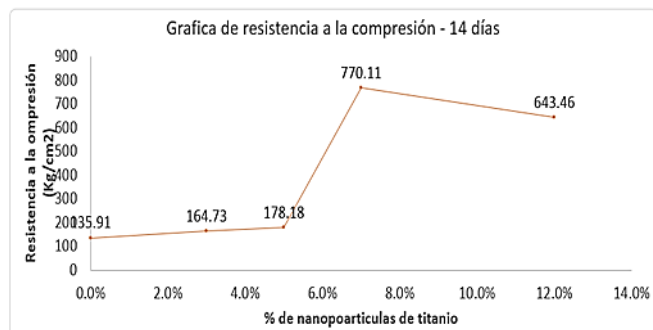
Fig.3 Resistencia a la compresión a los 7 días

Resistencia a la compresión con nano TiO₂ en 14 días

Para este ensayo de rotura se introduce la probeta a la máquina de compresión dando como resultados lo siguiente:

Se observa en la Figura N°4 que la probeta N°4 tiene un aumento de resistencia a la compresión dando como resultado 770.11 kg/ cm² con un 7% de nano TiO₂. por otro lado, la menor resistencia a la compresión es la PROBETA N°1 resultando 135.91kg/ cm².

Fig.4 Resistencia a la compresión a los 14 días



Resistencia a la compresión con nano TiO_2 en 28 días

Según la figura N°5, para este ensayo de rotura se introduce la probeta a la máquina de compresión dando como resultados lo siguiente:

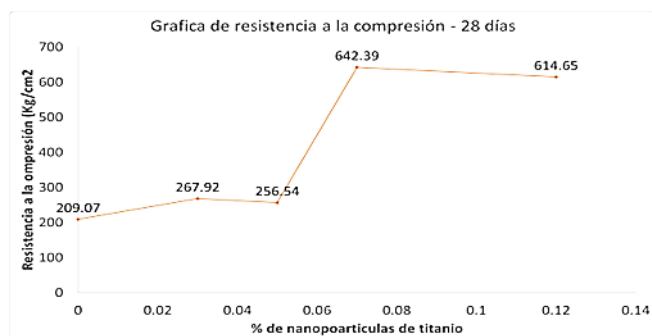


Fig.5 Resistencia a la compresión a los 28 días

El grado de hormigón para cemento grado 53 disponible en el mercado local se adopta mediante prueba y error. La resistencia por la adición de TiO_2 no es significativa y las resistencias de los especímenes mayores que la resistencia característica del hormigón prueban que son aptas para su uso como material estructural. Los resultados de resistencia a la tracción y a la flexión por rotura siguen la misma tendencia de disminución de la resistencia con un mayor porcentaje de TiO_2 y adicionando un efecto positivo en la compresión [17].

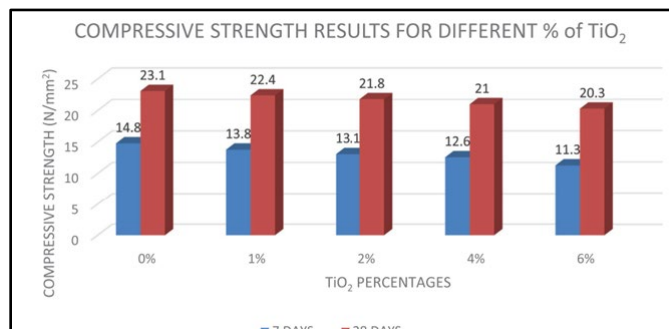


Fig.6. Concrete con TiO_2

IV. DISCUSIÓN

El objetivo principal de esta investigación consistió en diseñar un pavimento rígido incorporando nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) y evaluar su impacto en la resistencia a la compresión del concreto, con el fin de alcanzar un $f'c = 210$ kg/cm² en la Av. José Saco Rojas, de acuerdo con las normativas aplicables. Para ello, se elaboraron 15 probetas cilíndricas siguiendo los lineamientos establecidos por la NTP 339.034.

Los resultados obtenidos muestran que la dosificación óptima de TiO_2 en relación con el volumen de cemento es del 7%, porcentaje en el cual se observa un incremento notable en la resistencia a la compresión. No obstante, al exceder esta proporción, la resistencia tiende a disminuir debido a la formación de estructuras porosas dentro de la matriz cementicia. Este comportamiento puede atribuirse al hecho de que el TiO_2 -P25, debido a su alta pureza y capacidad fotocatalítica, reacciona con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento, produciendo un efecto puzolánico. Como resultado, se mejora la microestructura del concreto, incrementando su densidad mediante la reducción de vacíos y porosidad en la mezcla. Esta mayor compactación favorece directamente el aumento de la resistencia mecánica del material. El refuerzo estructural proporcionado por el TiO_2 es evidente tanto a corto como a mediano plazo, lo cual contribuye a una mayor resistencia frente a esfuerzos mecánicos y a la reducción de la formación de fisuras en la matriz cementicia. Aunque esta investigación no incluyó una evaluación exhaustiva del comportamiento del material a largo plazo, los ensayos realizados demostraron un incremento significativo en la resistencia a los 28 días de curado, lo que sugiere que la estabilidad química del concreto modificado con TiO_2 mejora su desempeño estructural.

Otro aspecto relevante es la durabilidad del concreto modificado con TiO_2 . Su resistencia a la corrosión y su capacidad para evitar reacciones adversas con otros componentes de la mezcla sugieren que podría contribuir a una mayor vida útil del pavimento. Además, las propiedades fotocatalíticas del TiO_2 abren la posibilidad de explorar su efecto en la reducción de contaminantes ambientales y su potencial para mejorar la sostenibilidad del material. En términos de aplicabilidad, los resultados indican que la incorporación de TiO_2 en pavimentos rígidos podría ser una alternativa viable para optimizar el desempeño mecánico y la durabilidad del concreto. No obstante, es fundamental llevar a cabo investigaciones adicionales para evaluar su impacto en propiedades como la retracción, el módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión, así como su comportamiento bajo condiciones de exposición prolongada a agentes ambientales adversos.

V. CONCLUSIONES

Se concluye que la inclusión de nanopartículas de TiO₂ en la mezcla de concreto para pavimentos rígidos genera mejoras sustanciales en sus propiedades mecánicas y de durabilidad. En el marco de esta investigación, se realizaron dosificaciones de TiO₂ al 3%, 5%, 7% y 12% en relación con el volumen de cemento, con el propósito de evaluar su impacto en la resistencia a la compresión del material.

Los resultados obtenidos indican que la dosificación óptima de TiO₂ es del 7%, ya que en esta proporción se observó un aumento significativo en la resistencia a la compresión sin generar efectos adversos en la estructura del concreto. Al superar este porcentaje, la resistencia disminuyó debido a la formación de una porosidad excesiva en la matriz cementicia. Este comportamiento se explica por la interacción del TiO₂-P25 con el hidróxido de calcio producido durante la hidratación del cemento, lo que mejora la densidad y la compactación de la mezcla. Además del incremento en la resistencia, el TiO₂ contribuye a mejorar la impermeabilidad del pavimento, reduciendo la filtración de agua y, por lo tanto, minimizando el desgaste del material. Asimismo, su alta estabilidad química sugiere que puede aumentar la durabilidad del concreto, disminuyendo su susceptibilidad a agentes externos como la humedad y la corrosión.

Siguiendo las directrices establecidas por la Cámara Peruana de la Construcción (CAPECO), se diseñó la mezcla y se elaboraron 15 probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, cumpliendo con las normativas pertinentes. Según los resultados obtenidos en los ensayos de compresión, la mezcla con una dosificación del 7% de TiO₂ mostró un aumento progresivo en la resistencia desde los primeros días de fraguado, alcanzando a los 28 días un valor máximo de $f'_c = 267.97 \text{ kg/cm}^2$, lo que valida el impacto positivo del TiO₂ en la resistencia mecánica del concreto. Finalmente, dado las propiedades fotocatalíticas del TiO₂, se recomienda que investigaciones futuras exploren su efecto en la sostenibilidad de los pavimentos, evaluando su potencial en la reducción de contaminantes ambientales y su comportamiento bajo condiciones de exposición prolongada a factores ambientales adversos. Finalmente, los resultados indican que el aumento de las dosificaciones ultrafinas disminuye la fluidez y aumenta la resistencia, ya que por el tamaño de las partículas finas actúan como relleno entre el cemento y los granos más gruesos.

VI. REFERENCIAS

- [1] H. Jun, L. Chuan-Xi, X. Chun-Long, L. Wei-Xiong, Y. Jun-Jian, and A. Lozano, "Decision-making system and verification of pavement diseases treatment scheme for highway reconstruction and extension," *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 151–162, Jan. 2021, doi: 10.2478/amns.2021.1.00032
- [2] A. Flores and V. Chang, "Relación entre la demanda de transporte y el crecimiento económico: Análisis dinámico mediante el uso del modelo ARDL," *Cuadernos de Economía*, vol. 43, no. 122, 2020, doi: 10.32826/cude.v42i122.123.
- [3] Y. Zhang and X. Sun, "A comprehensive assessment of nanomaterials reinforced lightweight aggregate concrete containing high-volume artificial shale ceramicsite," *Journal of Building Engineering*, vol. 84, May 2024, doi: 10.1016/j.jobbe.2024.108696.
- [4] V. Tapia et al., "Traffic regulation and environmental pollution by particulate material (2.5 and 10), sulfur dioxide, and nitrogen dioxide in Metropolitan Lima, Peru," *Rev Peru Med Exp Salud Publica*, vol. 35, no. 2, pp. 190–197, Apr. 2018, doi: 10.17843/rpmesp.2018.352.3250.
- [5] H. R. Ahn, S. W. Lee, J. H. Kim, and Y. K. Kim, "Estimation of Nitrogen Oxides (NOx) Removal Efficiency for TiO₂ Concrete," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 11, 2023, doi: 10.3390/su15119098.
- [6] Y. Su, J. Zhu, X. Long, L. Zhao, C. Chen, and C. Liu, "Statistical effects of pore features on mechanical properties and fracture behaviors of heterogeneous random porous materials by phase-field modeling," *Int J Solids Struct*, vol. 264, 2023, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2022.112098.
- [7] T. Vignesh, A. Sumathi, and K. Saravana Raja Mohan, "Study on Self-Cleaning Concrete Using Nano-liquid TiO₂," *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, no. 3.12, 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i3.12.16551.
- [8] Y. Zhang, Y. Zhou, X. Dong, X. Xi, and P. Dong, "Recent advances in TiO₂-based photocatalytic concrete: Synthesis strategies, structure characteristics, multifunctional applications, and CFD simulation," Sep. 15, 2024, Elsevier B.V., doi: 10.1016/j.ccej.2024.154186.
- [9] A. Neckel, D. Pinto, B. Adelodun, and G. L. Dotto, "An Analysis of Nanoparticles Derived from Coal Fly Ash Incorporated into Concrete," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 7, 2022, doi: 10.3390/su14073943.
- [10] J. Jenima et al., "A comprehensive review of titanium dioxide nanoparticles in cementitious composites," Oct. 30, 2024, *Elsevier Ltd*, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e39238.
- [11] M. Al-Zu'bi, M. Fan, and L. Anguilano, "Near-surface mounted-FRP flexural retrofitting of concrete members using nanomaterial-modified epoxy adhesives," *Journal of Building Engineering*, vol. 84, 2024, doi: 10.1016/j.jobbe.2024.108549.
- [12] S. A. Mostafa et al., "Influence of nanoparticles from waste materials on mechanical properties, durability and microstructure of uhpc," *Materials*, vol. 13, no. 20, 2020, doi: 10.3390/ma13204530.
- [13] M. Ghosal and A. K. Chakraborty, "Engineering the properties of nanomaterials for its use in cement concrete," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 7502–7506, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.206.
- [14] W. C. Liao, P. S. Chen, C. W. Hung, and S. K. Wagh, "An innovative test method for tensile strength of concrete by applying the strut-and-tie methodology," *Materials*, vol. 13, no. 12, pp. 1–20, Jun. 2020, doi: 10.3390/ma13122776.
- [15] C. Xu, H. H. Liao, Y. L. Chen, X. Du, B. Peng, and T. M. Fernandez-Steeger, "Corrosion performance of nano-tio2-modified concrete under a dry-wet sulfate environment," *Materials*, vol. 14, no. 19, Oct. 2021, doi: 10.3390/ma14195900.
- [16] S. Ghorbanzadeh, M. Chamack, A. M. Mohammadi, and N. Zoghi, "Evaluation of the performance of concrete by adding silica nanoparticles and zeolite: A method deviation tolerance study," *Constr Build Mater*, vol. 413, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134962.
- [17] S. Faisal and A. Kumar Patra, "Investigation on photocatalytic and structural characteristics of normal concrete using TiO₂ at ambient temperature," *Mater Today Proc*, vol. 68, pp. 164–173, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.08.425.
- [18] A. T. de Vasconcellos, P. R. de Matos, C. A. Casagrande, A. V. S. Ribeiro, and L. R. Prudêncio, "Evaluating the variability of the modulus of elasticity of concrete through the use of different types and batches of aggregate," *Revista Materia*, vol. 26, no. 4, 2021, doi: 10.1590/S1517-707620210004.1317.
- [19] X. Du et al., "Modification mechanism of combined nanomaterials on high performance concrete and optimization of nanomaterial content," *Journal*

- of Building Engineering, vol. 64, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2022.105648.
doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120103.
- [20] N. E. Obando, D. A. Pinilla, H. Zea, and A. Pataquiva-Mateus, "Evaluación y caracterización de nanotubos de TiO₂ sintetizados por vía hidrotérmica con aplicación en ingeniería de materiales Evaluation and characterization of TiO₂ nanotubes synthesized via hydrothermal method with application in materials engineering," 2019.
- [21] H. Elia, "Using Nano- and Micro-Titanium Dioxide (TiO₂) in Concrete to Reduce Air Pollution," J Nanomed Nanotechnol, vol. 09, no. 03, 2018.
doi: 10.4172/2157-7439.1000505.