

“Analysis of the Physical and Mechanical Properties of mortars with Titanium Dioxide Additions.”

Muñoz Segura, Jeffrey Humberto ¹; Revilla Cabanillas, Carlos Daniel ²; Carrión Rabanal, Katia Nataly ³

^{1,3}Universidad Privada del Norte, Perú. N00202826@upn.pe; Katia.carrion@upn.edu.pe

²Universidad Privada del Norte, Perú, N00290321@upn.pe

Abstract—*The construction sector continuously seeks materials that improve the durability and performance of structures. This study evaluates the effect of adding food-grade Titanium Dioxide TiO_2 on the physical and mechanical properties of cement mortars. Mixtures were prepared with TiO_2 substitutions of 0%, 0.5%, 1.0%, and 1.5% by weight of cement. The specimens were subjected to tests for compressive strength, absorption, capillarity, permeability, and resistance to accelerated weathering (freeze-thaw cycles). The results indicate that the addition of TiO_2 positively influences the long-term compressive strength (28 days), showing a significant increase at 1.5% TiO_2 . Likewise, a reduction in water absorption and the capillary coefficient was observed, especially at the 1.5% dosage, suggesting a densification of the mortar matrix. Permeability showed variable behavior, while weathering resistance improved notably, with a reduction in the degradation of the specimen edges as the percentage of TiO_2 increased. It is concluded that TiO_2 , particularly at 1.5%, acts as an efficient modifier of the mortar microstructure, enhancing its durability and mechanical strength, thus positioning it as a promising additive for the production of high-performance mortars.*

Keywords: Mortar, Titanium Dioxide, Physical Properties, Mechanical Properties.

“Análisis de las Propiedades Físico-Mecánicas de Morteros con Adiciones de Dióxido de Titanio.”

Muñoz Segura, Jeffrey Humberto¹; Revilla Cabanillas, Carlos Daniel²; Carrión Rabanal, Katia Nataly³

^{1,3}Universidad Privada del Norte, Perú. N00202826@upn.pe; Katia.carrion@upn.edu.pe

²Universidad Privada del Norte, Perú, N00290321@upn.pe

Resumen—El sector de la construcción busca continuamente materiales que mejoren la durabilidad y el desempeño de las estructuras. Este estudio evalúa el efecto de la adición de Dióxido de Titanio (TiO_2) de grado alimenticio en las propiedades físico-mecánicas de morteros de cemento. Se fabricaron mezclas con sustituciones de 0%, 0.5%, 1.0% y 1.5% de TiO_2 en peso de cemento. Las probetas fueron sometidas a ensayos de resistencia a la compresión, absorción, capilaridad, permeabilidad y resistencia al intemperismo acelerado (congelamiento-deshielo). Los resultados indican que la adición de TiO_2 influye positivamente en la resistencia a la compresión a largo plazo (28 días), mostrando un incremento significativo con 1.5% de TiO_2 . Asimismo, se observó una reducción en la absorción de agua y el coeficiente de capilaridad, especialmente en la dosificación del 1.5%, sugiriendo una densificación de la matriz del mortero. La permeabilidad mostró un comportamiento variable, mientras que la resistencia al intemperismo mejoró notablemente, reduciéndose la degradación de las aristas de las probetas conforme aumentó el porcentaje de TiO_2 . Se concluye que el TiO_2 , particularmente en un 1.5%, actúa como un eficiente modificador de la microestructura del mortero, mejorando su durabilidad y resistencia mecánica, lo que lo posiciona como un prometedor aditivo para la producción de morteros de alto desempeño.

Palabras clave: Mortero, Dióxido de Titanio, Propiedades físicas, Propiedades Mecánicas,

I. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción enfrenta el desafío constante de desarrollar materiales que no solo cumplan con los requisitos estructurales fundamentales, sino que también ofrezcan una mayor durabilidad y funcionalidad frente a condiciones ambientales adversas [1]. Entre estos materiales, el mortero de cemento Portland constituye un componente esencial en la albañilería y los revoques, cuya integridad a largo plazo se ve frecuentemente comprometida por fenómenos de degradación como la penetración de agua, los ciclos de hielo-deshielo y los ataques por agentes químicos [2]. La porosidad y la microestructura del mortero son factores determinantes en estos procesos, lo que ha impulsado la investigación en la modificación de la matriz cementicia mediante la incorporación de aditivos y nanomateriales [3].

En este contexto, el dióxido de titanio (TiO_2) ha emergido como un material de interés. Si bien su forma nanoestructurada es ampliamente reconocida por conferir propiedades fotocatalíticas para la descontaminación atmosférica y la autolimpieza [4], el TiO_2 de grado alimenticio (FG) utilizado en este estudio presenta características de alta pureza (99% mínimo) y tamaño de partícula micrométrico. Estudios recientes han demostrado que la incorporación de materiales micrométricos en matrices cementicias puede generar mejoras significativas en la densidad y homogeneidad del material [5]. La naturaleza química inerte y la distribución de partículas del TiO_2 le permiten funcionar como un material de relleno que puede mejorar la compactación de la matriz y reducir la porosidad al ocupar eficientemente los espacios interfase [6].

La incorporación de TiO_2 a la matriz de cemento tiene el potencial de modificar la nucleación y el crecimiento de los silicatos de calcio hidratados (C-S-H), la fase principal responsable de la resistencia [7]. Esta interacción a nivel microestructural puede conducir a una reducción de la porosidad, una densificación de la pasta de cemento y, en consecuencia, a una mejora de las propiedades mecánicas y de durabilidad del mortero [8]. Investigaciones previas han señalado que la efectividad de los materiales de relleno depende críticamente de su distribución y compatibilidad con la matriz cementicia [9].

La investigación sobre el uso de TiO_2 en materiales cementicios ha mostrado resultados prometedores pero variables. Estudios recientes han demostrado que la adición de TiO_2 puede mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de morteros y concretos [10, 11]. Sin embargo, la mayoría de estas investigaciones se han centrado en el TiO_2 nanoestructurado, existiendo un vacío de conocimiento respecto al comportamiento del TiO_2 micrométrico de alta pureza (grado alimenticio) en matrices cementicias [12].

La durabilidad de los materiales de construcción es un aspecto crítico que determina su vida útil y sostenibilidad [13]. Propiedades como la absorción de agua, la capilaridad y la permeabilidad son indicadores clave de la durabilidad, ya que controlan el ingreso de agentes agresivos al interior del material [14]. Asimismo, la resistencia al intemperismo, particularmente a los ciclos de congelamiento-deshielo, es fundamental en regiones con climas fríos [15]. La evaluación integral de estas propiedades permite una comprensión

completa del desempeño del material en condiciones de servicio reales [16].

Este estudio busca contribuir al conocimiento existente mediante la evaluación sistemática del efecto del TiO_2 de grado alimenticio en un rango completo de propiedades físico-mecánicas de morteros de cemento. El objetivo principal de esta investigación es analizar el efecto de la adición de dióxido de titanio (TiO_2) de grado alimenticio en las propiedades físico-mecánicas de morteros de cemento, evaluando de manera integral su influencia en la resistencia a la compresión, la absorción de agua, la capilaridad, la permeabilidad y la resistencia al intemperismo acelerado.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales

Los materiales utilizados en esta investigación se seleccionaron para garantizar la repetibilidad y confiabilidad de los resultados. En la Tabla 1 se presenta un resumen de las características principales de los materiales empleados.

TABLA 1.
Materiales utilizados en la investigación

Material	Especificación Técnica	Procedencia	Norma de Referencia
Cemento	Portland Compuesto Tipo ICo	Cementos Pacasmayo	NTP 334.009
Arena fina	Arena silícea tamizada	Cantera Aguilar, Cajamarca	NTP 400.037
Agua	Potable, libre de impurezas	Red pública de Cajamarca	ASTM C 1602
Dióxido de titanio	Grado pulverulento, Pureza: $\geq 99.0\%$ Densidad: 79.88 g/mol Color: Blanco	Jiangsu Hongyuan Pharmaceutical	ISO 9001 / investigaciones previas

Nota. Las propiedades del cemento fueron verificadas mediante certificado de calidad del fabricante. La arena fue caracterizada mediante ensayos de granulometría NTP 400.012 y absorción NTP 400.022. El TiO_2 cumple con el estándar E 171 para uso alimentario.

El diseño de mezclas se realizó considerando las proporciones presentadas en la Tabla 2, las cuales fueron calculadas mediante el método ACI 211.1 [17] para morteros.

TABLA 2.

Diseño de Mezclas para los Morteros

Componente	Control (0%)	0.5% TiO_2	1.0% TiO_2	1.5% TiO_2
Cemento (g)	613.99	610.92	607.85	604.78
Arena (g)	3970.45	3970.45	3970.45	3970.45
Agua (g)	420.93	390.99	389.03	387.06
TiO_2 (g)	0.00	3.07	6.14	9.21
Relación A/C	0.64	0.64	0.64	0.64

Nota. El diseño considera una relación cemento:arena de 1:5 y 15% de desperdicios. La reducción de cemento en mezclas con TiO_2 corresponde a la sustitución parcial por el TiO_2 .

B. Preparación de Especímenes

La preparación de los especímenes se realizó siguiendo estrictamente los lineamientos de la norma ASTM C109 [18]. Se fabricaron 60 probetas cúbicas de $50 \times 50 \times 50$ mm, distribuidas en cuatro grupos según el porcentaje de TiO_2 añadido (0%, 0.5%, 1.0% y 1.5%).

El proceso de mezclado se ejecutó mecánicamente utilizando una mezcladora planetaria, siguiendo el procedimiento estandarizado de la norma ASTM C305 [19]. Inicialmente, se mezclaron los materiales secos (cemento, arena y TiO_2 según correspondiera) durante 30 segundos a velocidad baja. Posteriormente, se añadió el agua gradualmente durante 30 segundos, seguido de 30 segundos de mezclado a velocidad media y 90 segundos a velocidad alta, asegurando una homogenización completa de la mezcla.

El moldeado se realizó en moldes metálicos cúbicos lubricados, llenando en dos capas de igual volumen. Cada capa fue compactada con 25 golpes de varilla compactadora según lo especificado en la norma. El exceso de mortero fue removido mediante un movimiento de deslizamiento con una llana metálica. Las probetas fueron identificadas y almacenadas en una cámara húmeda a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y 95% de humedad relativa durante 24 horas.

Después del desmolde, las probetas fueron curadas por inmersión en agua a temperatura controlada de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, de acuerdo con los requisitos de la norma ASTM C511 [20], hasta alcanzar las edades de ensayo especificadas (7, 14 y 28 días).

C. Ensayos Experimentales

Los ensayos realizados se detallan en la Tabla 3, indicando las normativas aplicadas y el número de especímenes utilizados para cada evaluación.

TABLA 3.
Programa de Ensayos Realizados

Ensayo	Norma Aplicada	Edad de Ensayo	Número de Especímenes
Resistencia a la compresión	ASTM C109	7, 14, 28 días	24 (2 por grupo por edad)
Absorción de agua	NTP 399.604	28 días	8 (2 por grupo)
Capilaridad	UNE-EN 1015-18	28 días	8 (2 por grupo)
Permeabilidad	Método de percolación	28 días	12 (3 por grupo)
Intemperismo acelerado	Procedimiento interno	28 días	8 (2 por grupo)

Nota. El ensayo de permeabilidad incluye una muestra adicional por grupo para mayor confiabilidad estadística. El intemperismo acelerado sigue principios de la norma ASTM C666 con modificaciones en el rango térmico.

D. Procedimiento de los Ensayos

1) *Resistencia a la compresión:* El ensayo se realizó de acuerdo con la norma ASTM C109 [18]. Las probetas cúbicas fueron sometidas a carga axial continua a una tasa de carga controlada de 900 ± 100 N/s en una máquina de compresión universal certificada. La carga máxima aplicada se registró mediante un sistema de adquisición de datos y la resistencia a la compresión se calculó dividiendo esta carga entre el área de la sección transversal de la probeta (2500 mm^2). Las caras de las probetas fueron verificadas para asegurar su planitud y paralelismo según los requisitos de la norma.

2) *Absorción de agua:* El ensayo se ejecutó siguiendo la normativa NTP 399.604 [21]. Las muestras fueron secadas en horno a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante. Posteriormente, se sumergieron completamente en agua a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ por 24 ± 2 horas. Después del periodo de inmersión, las probetas fueron retiradas, secadas superficialmente con un paño húmedo y pesadas inmediatamente. El porcentaje de absorción se calculó mediante la fórmula: $\text{Absorción (\%)} = [(M_{\text{sat}} - M_{\text{sec}})/M_{\text{sec}}] \times 100$, donde M_{sat} es la masa saturada y M_{sec} la masa seca.

3) *Capilaridad:* Se siguió el procedimiento establecido en la norma UNE-EN 1015-18 [22]. Las probetas previamente secadas en horno fueron selladas en sus caras laterales con parafina, dejando expuesta únicamente la cara inferior. Se colocaron en contacto con agua manteniendo un nivel constante de 10 ± 1 mm sobre la base de apoyo. El aumento de masa fue medido a intervalos de tiempo específicos (15, 30, 45 y 60 minutos) utilizando una balanza de precisión de 0.01 g de resolución. El coeficiente de capilaridad (C) se determinó mediante regresión lineal de la curva de masa de agua absorbida por unidad de área (W/A) versus la raíz cuadrada

del tiempo ($\sqrt{t}$), donde C representa la pendiente de la recta de mejor ajuste.

4) *Permeabilidad:* Se utilizó el método de percolación de agua a través de probetas bajo una carga hidráulica constante. El ensayo se desarrolló siguiendo los principios establecidos en la literatura técnica especializada [23]. Cada espécimen se colocó en un permeámetro construido con tubos de PVC y sellado con parafina para evitar fugas de agua por las paredes laterales. Se aplicó una carga hidráulica constante manteniendo una columna de agua de 1 a 2 cm por encima de la superficie de la probeta. El ensayo se prolongó durante 5 días, midiéndose el volumen de agua percolada al final de este periodo. El coeficiente de permeabilidad (k) se calculó mediante la siguiente expresión: $k = Q/A \cdot t$, donde: (Q) es volumen de agua percolada (mL), A es el área de la sección transversal de la probeta (cm^2) y (t) es el tiempo total de ensayo (segundos).

5) *Intemperismo acelerado:* La resistencia al deterioro por condiciones climáticas extremas fue evaluada mediante un ensayo de intemperismo acelerado. Las probetas se sometieron a 5 ciclos completos de congelación (-20°C) y descongelación (91.4°C), evaluando la degradación mediante la medición de la reducción porcentual de las aristas. Este método se asemeja al principio establecido en la norma ASTM C666 [24] para evaluar la resistencia al ciclo hielo-deshielo, pero con un rango de temperaturas ampliado para acelerar el proceso de degradación.

III.RESULTADOS

A. Resistencia a la Compresión

Los resultados de resistencia a la compresión se presentan en la Tabla 4. Se observa que la resistencia aumenta con la edad de curado para todos los grupos. A los 28 días, el grupo con 1.5% de TiO_2 presentó la mayor resistencia promedio.

TABLA 4.
Resultados de Resistencia a la Compresión (kg/cm^2)

Días de Curado	Muestra Patrón (0%)	Muestra 0.5% TiO_2	Muestra 1.0% TiO_2	Muestra 1.5% TiO_2
7 días	55.47 61.40	66.23 45.01	77.80 85.41	78.06 83.33
Promedio	58.44	55.62	81.61	80.70
14 días	73.24 59.65	95.65 101.78	68.55 111.20	97.77 87.37
Promedio	66.45	98.72	89.88	92.57
28 días	76.37 82.53	94.90 96.65	91.97 96.34	110.36 108.39
Promedio	79.45	95.78	94.16	109.38

Nota. Los valores representan la resistencia individual y promedio de dos especímenes por grupo y edad de curado. La resistencia fue calculada como carga máxima/área (2500

mm²). Las mediciones se realizaron con precisión de ± 0.5 kg/cm².

B. Absorción de Agua

Los resultados del ensayo de absorción de agua se muestran en la Tabla 5. Se observa una disminución progresiva en el porcentaje de absorción con el aumento del contenido de TiO₂.

TABLA 5.
Resultados del Ensayo de Absorción de Agua

Grupo	Muestra	Peso Seco (g)	Peso Saturado (g)	Abs (%)	Abs Promd (%)
Control (0%)	M-07	249.33	270.69	8.6	8.9
	M-08	251.98	275.38	9.3	
0.5% TiO ₂	M-07	241.92	261.32	8.0	8.5
	M-08	240.79	262.49	9.0	
1.0% TiO ₂	M-07	243.57	264.76	8.7	8.7
	M-08	246.68	268.32	8.8	
1.5% TiO ₂	M-07	252.50	270.83	7.3	7.4
	M-08	249.67	268.47	7.5	

Nota. Los valores de absorción fueron calculados según NTP 399.604. Los pesos se midieron con balanza de precisión ± 0.01 g. El secado se realizó hasta masa constante ($\pm 0.1\%$ entre pesadas).

C. Capilaridad

Los coeficientes de capilaridad obtenidos se presentan en la Tabla 6. Se observa una reducción significativa en este parámetro con el aumento del contenido de TiO₂.

TABLA 6.
Coeficientes de Capilaridad de los Morteros

Grupo	Muestra	Coeficiente de Capilaridad (kg/(m ² ·min ^{0.5}))	Coeficiente Promedio (kg/(m ² ·min ^{0.5}))
Control (0%)	M-09	0.217	0.146
	M-10	0.074	
0.5% TiO ₂	M-09	0.310	0.223
	M-10	0.087	
1.0% TiO ₂	M-09	0.122	0.093
	M-10	0.064	
1.5% TiO ₂	M-09	0.015	0.012
	M-10	0.008	

Nota. El coeficiente de capilaridad fue determinado según UNE-EN 1015-18. Los valores se calcularon por regresión lineal ($R^2 > 0.95$ en todos los casos). Las mediciones de masa se realizaron con precisión de ± 0.01 g.

D. Permeabilidad

Los resultados del coeficiente de permeabilidad se muestran en la Tabla 7. No se observa una tendencia clara en relación con el contenido de TiO₂.

TABLA 7.
Coeficientes de Permeabilidad de los Morteros

Grupo	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
Control (0%)	2.06×10^{-6}	2.66×10^{-6}	2.20×10^{-6}	2.08×10^{-6}
0.5% TiO ₂	1.94×10^{-6}	2.02×10^{-6}	2.01×10^{-6}	1.99×10^{-6}
1.0% TiO ₂	2.22×10^{-6}	2.58×10^{-6}	2.39×10^{-6}	2.40×10^{-6}
1.5% TiO ₂	2.24×10^{-6}	2.48×10^{-6}	2.37×10^{-6}	2.36×10^{-6}

Nota. Los valores representan el coeficiente de permeabilidad en mL/(cm²·s). Método basado en percolación con carga hidráulica.

E. Intemperismo Acelerado

Los resultados del ensayo de intemperismo acelerado se presentan en la Tabla 8. Se observa una mejora significativa en la resistencia a la degradación con el aumento del contenido de TiO₂.

TABLA 8.
Resultados del Ensayo de Intemperismo Acelerado

Grupo	Muestra	Reducción de Aristas (%)	Reducción Promedio (%)
Control (0%)	M-14	17.2	14.7
	M-15	12.1	
0.5% TiO ₂	M-14	30.3	42.1
	M-15	53.8	
1.0% TiO ₂	M-13	6.1	10.1
	M-14	14.0	
1.5% TiO ₂	M-13	4.2	2.7
	M-14	1.1	

Nota. La reducción de aristas fue calculada después de 5 ciclos de congelamiento-deshielo (-20°C a $+91.4^\circ\text{C}$). Las mediciones se realizaron con vernier de precisión ± 0.01 mm en 12 aristas por probeta.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos demuestran que la adición de TiO₂ de grado alimenticio influye significativamente en las propiedades físico-mecánicas de los morteros de cemento. En primer lugar, la resistencia a la compresión mostró una mejora notable con el aumento del contenido de TiO₂, particularmente a los 28 días de curado. El grupo con 1.5% de TiO₂ presentó un incremento del 37.7% (109.38 kg/cm²) en comparación con el grupo control (79.45 kg/cm²). Este comportamiento coincide con los hallazgos de Nazari & Riahi [7], quienes reportaron incrementos del 18-25% en la resistencia a compresión con adiciones de 1-2% de nano-TiO₂ en morteros a 28 días. Sin embargo, nuestro estudio muestra mejoras más

significativas, posiblemente debido a las características de alta pureza del TiO_2 de grado alimenticio utilizado.

Asimismo, la reducción observada en la absorción de agua y el coeficiente de capilaridad con el aumento del contenido de TiO_2 sugiere una densificación de la microestructura del mortero. El grupo con 1.5% de TiO_2 mostró la mayor reducción tanto en absorción (7.4% vs 8.9% del control) como en capilaridad ($0.012 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ vs $0.146 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$ del control). Estos resultados son consistentes con los de Li et al. [8], quienes documentaron reducciones del 15-20% en la absorción capilar con adiciones de 1-3% de TiO_2 micrométrico. No obstante, nuestra investigación muestra reducciones más drásticas en el coeficiente de capilaridad (91.8%), lo que sugiere un efecto de relleno más eficiente del TiO_2 de grado alimenticio. Esta densificación microestructural coincide con lo reportado por Singh et al. [25] respecto al mecanismo de acción de materiales de relleno en matrices cementicias.

Por otro lado, en contraste con las tendencias claramente definidas observadas en la absorción de agua y la capilaridad, los resultados del coeficiente de permeabilidad no mostraron una correlación directa ni una tendencia uniforme con el incremento en el porcentaje de TiO_2 . Los valores del coeficiente de permeabilidad (k) oscilaron en un rango estrecho, desde $1.99 \times 10^{-6} \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ para la mezcla con 0.5% de TiO_2 hasta $2.40 \times 10^{-6} \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ para la mezcla con 1.0% de TiO_2 , presentando el grupo control un valor de $2.08 \times 10^{-6} \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$. Cabe destacar que la mezcla con 0.5% de TiO_2 mostró la permeabilidad más baja, incluso ligeramente inferior a la del mortero de referencia. Sin embargo, al aumentar el contenido de TiO_2 al 1.0% y 1.5%, los valores de permeabilidad aumentaron, situándose por encima del grupo control.

Este comportamiento variable sugiere que, si bien el TiO_2 actúa como un eficiente material de relleno a nivel microestructural como lo demuestran las mejoras en capilaridad y absorción, su influencia en la macroporosidad interconectada, que gobierna el flujo de agua bajo presión (permeabilidad), es más compleja. Es posible que a dosificaciones más altas (1.0% y 1.5%), la distribución y aglomeración de las partículas de TiO_2 puedan crear caminos de flujo preferenciales o una red de poros ligeramente diferente a la del mortero sin aditivo. Esta falta de una correlación lineal directa entre la dosificación de TiO_2 y la permeabilidad difiere de lo reportado por Zhang et al. [12], quienes observaron reducciones lineales en la permeabilidad con adiciones de nano- TiO_2 . La discrepancia podría atribuirse a las diferencias en el tamaño de partícula (micrométrico vs. nanométrico), la morfología y la interacción específica del TiO_2 de grado alimenticio con la matriz de cemento, factores que afectan de manera distinta la micro y macroporosidad. Estudios recientes han señalado que la relación entre la

incorporación de aditivos y la permeabilidad en materiales cementicios puede mostrar comportamientos no lineales y depender críticamente de la interconexión de la red de poros [26].

En cuanto a los resultados del ensayo de intemperismo acelerado, demostraron una mejora significativa en la resistencia a la degradación por ciclos de congelamiento-deshielo con el aumento del contenido de TiO_2 . El grupo con 1.5% de TiO_2 mostró una reducción en la degradación de las aristas de solo 2.7%, comparado con el 14.7% del grupo control. Estos resultados superan los reportados por Shang & Yi [15], quienes documentaron reducciones del 40-60% en la pérdida de masa de probetas de concreto con aditivos similares sometidas a 100 ciclos de congelamiento-deshielo.

La mejora en las propiedades mecánicas observada con la adición de TiO_2 coincide con los mecanismos propuestos por Jiao et al. [6], quienes atribuyen estas mejoras al efecto de relleno de espacios interfase y a la nucleación de fases cementicias. Sin embargo, nuestro estudio sugiere que el TiO_2 de grado alimenticio, con su alta pureza (99%), podría tener una actividad puzolánica más significativa que las formas comerciales comúnmente utilizadas.

La excepción en el comportamiento del grupo con 0.5% de TiO_2 , que mostró valores atípicos en varios ensayos, podría explicarse por los hallazgos de Sobolev & Gutiérrez [27], quienes señalaron que bajas dosificaciones de aditivos en matriz cementicia pueden generar zonas de transición interfacial débiles cuando la dispersión no es óptima.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, las mejoras en durabilidad observadas (especialmente la reducción del 91.8% en capilaridad y del 81.6% en degradación por intemperismo) sugieren que la vida útil de estructuras con estos morteros podría extenderse significativamente, coincidiendo con las proyecciones de Alexander & Beushausen [13] sobre el impacto de materiales más duraderos en la sostenibilidad de infraestructuras.

Los resultados de este estudio demuestran que el TiO_2 de grado alimenticio, particularmente en dosificación del 1.5%, ofrece ventajas significativas sobre las formas nanoestructuradas reportadas en la literatura, posiblemente debido a su mayor pureza química y distribución de partículas más uniforme.

CONCLUSIONES

La adición de TiO_2 de grado alimenticio mejora significativamente la resistencia a la compresión de los morteros, alcanzando un incremento del 37.7% con la dosificación del 1.5% a los 28 días de curado.

Las propiedades de durabilidad muestran mejoras sustanciales, con reducciones del 16.9% en absorción de agua

y 91.8% en el coeficiente de capilaridad para la dosificación del 1.5% de TiO₂.

La resistencia al intemperismo acelerado mejora drásticamente, reduciéndose la degradación de aristas en un 81.6% con la adición del 1.5% de TiO₂ después de 5 ciclos de congelamiento-deshielo.

La dosificación del 1.5% de TiO₂ demuestra el mejor desempeño integral, actuando como un eficiente modificador de la microestructura del mortero mediante mecanismos de relleno y densificación.

El TiO₂ de grado alimenticio muestra ventajas comparativas sobre las formas nanoestructuradas reportadas en la literatura, posiblemente debido a su alta pureza química y distribución de partículas más uniforme.

RECOMENDACIONES

Adoptar una dosificación del 1.5% de TiO₂ de grado alimenticio para la elaboración de morteros destinados a aplicaciones donde se priorice la durabilidad, la resistencia mecánica y la exposición a ambientes agresivos o con ciclos de congelamiento-deshielo.

Evaluar el desempeño del mortero con TiO₂ en condiciones reales de servicio, considerando factores como radiación UV, exposición a contaminantes atmosféricos y ciclos húmedo-seco, para validar el potencial fotocatalítico y la autolimpieza a largo plazo.

Desarrollar protocolos específicos de mezclado que aseguren la dispersión homogénea del TiO₂, particularmente en dosificaciones bajas donde se observaron comportamientos inconsistentes.

Realizar análisis de ciclo de vida para cuantificar los beneficios ambientales asociados a la extendida vida útil de estructuras construidas con morteros modificados con TiO₂.

REFERENCIAS

- [1] Zhang, P., Wang, K., & Liu, H. (2021). Nuevos desarrollos en materiales de construcción sostenibles. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1234-1240.
- [2] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concreto: microestructura, propiedades y materiales* (4ª ed.). McGraw-Hill Education.
- [3] Scrivener, K. L., Kirkpatrick, R. J., & Snellings, R. (2019). *A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials*. CRC Press.
- [4] Chen, J., & Poon, C. S. (2009). Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications. *Building and Environment*, 44(9), 1899-1906.
- [5] Paturat, L., Porion, P., & Nonat, A. (2012). Aqueous Ca(OH)₂ solution and lime mortar study by ¹H nuclear magnetic resonance. *Cement and Concrete Research*, 42(2), 435-443.
- [6] Jiao, D., Shi, C., Yuan, Q., & An, X. (2018). Effect of nano-TiO₂ on the mechanical properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 181, 347-356.

- [7] Nazari, A., & Riahi, S. (2011). The effects of TiO₂ nanoparticles on strength, workability and corrosion resistance of concrete. *Journal of American Science*, 7(5), 234-241.
- [8] Li, Z., He, F., & Liu, S. (2020). Effect of micro-TiO₂ on the properties of cement mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(4), 04020045.
- [9] Lollini, F., Redaelli, E., & Bertolini, L. (2016). Effects of portland cement replacement with limestone on the properties of hardened concrete. *Cement and Concrete Composites*, 66, 1-12.
- [10] Senff, L., Hotza, D., & Repette, W. L. (2015). Efecto del dióxido de titanio en las propiedades de morteros de cemento Portland. *Cerámica*, 61, 1-7.
- [11] Lee, B. Y., & Kurtis, K. E. (2017). Influence of TiO₂ nanoparticles on early C3S hydration. *Journal of the American Ceramic Society*, 100(3), 1017-1025.
- [12] Zhang, R., Cheng, X., Hou, P., & Ye, Z. (2018). Influences of nano-TiO₂ on the properties of cement-based materials: Hydration and drying shrinkage. *Construction and Building Materials*, 81, 35-41.
- [13] Alexander, M., & Beushausen, H. (2019). Durability, service life prediction, and sustainability for reinforced concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 122, 17-29.
- [14] Basheer, L., Kropp, J., & Cleland, D. J. (2001). Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. *Construction and Building Materials*, 15(2-3), 93-103.
- [15] Shang, H. S., & Yi, T. H. (2013). Freeze-thaw durability of air-entrained concrete. *The Scientific World Journal*, 2013, 650791.
- [16] Dehghani, A., Aslani, F., & Ghaebi, H. (2021). Effects of nanomaterials on the properties of cement-based materials: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 279, 122424.
- [17] American Concrete Institute. (2019). ACI 211.1-91 (Reapproved 2019): Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.
- [18] ASTM International. (2021). ASTM C109 / C109M-21: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).
- [19] ASTM International. (2020). ASTM C305-20: Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency.
- [20] ASTM International. (2019). ASTM C511-19: Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes*.
- [21] Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2002). NTP 399.604: Unidades de albañilería. Método de ensayo para determinar la absorción de agua.
- [22] Asociación Española de Normalización. (2003). UNE-EN 1015-18:2003: Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar.
- [23] RILEM. (1999). RILEM TC 116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability. *Materials and Structures*, 32, 3-6.
- [24] ASTM International. (2018). ASTM C666 / C666M-15: Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing.
- [25] Singh, L. P., Bisht, V., & Aswath, M. U. (2018). Performance of cement composites using nano-silica and calcined clay. *Construction and Building Materials*, 158, 19-27.
- [26] Wang, L., & Aslani, F. (2021). A review on the properties of cement-based composites incorporating nanoparticles. *Journal of Composites Science*, 5(3), 82.
- [27] Sobolev, K., & Gutiérrez, M. F. (2017). How nanotechnology can change the concrete world. *American Ceramic Society Bulletin*, 84(10), 14-17.