



# UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

## FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

Concreto fotocatalítico con adición de nanomateriales de dióxido de titanio  
para aumentar la durabilidad en elementos exteriores en edificaciones

### TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

### AUTORES

Caballa Olivares, Carlos Alejandro  
ORCID: 0009-0000-5945-3432

Fraga Rojas, Juan Jose  
ORCID: 0009-0008-0187-4080

### ASESOR

Chavarría Reyes, Liliana Janet  
ORCID: 0000-0002-1759-2132

**Lima, Perú**

**2023**

## **METADATOS COMPLEMENTARIOS**

### **Datos de los autores**

Caballa Olivares, Carlos Alejandro

DNI: 71249456

Fraga Rojas, Juan Jose

DNI: 70078121

### **Datos de asesor**

Chavarría Reyes, Liliana Janet

DNI: 25481792

### **Datos del jurado**

JURADO 1

Pereyra Salardi, Enriqueta

DNI: 06743824

ORCID: 0000-0003-2527-3665

JURADO 2

Chavarry Vallejos, Carlos Magno

DNI: 07410234

ORCID: 0000-0003-0512-8954

JURADO 3

Torres Chung, Cesar Roberto

DNI: 41182279

ORCID: 0000-0002-3212-2817

### **Datos de la investigación**

Campo del conocimiento OCDE: 02.01.01

Código del Programa: 732016

## DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Nosotros, Carlos Alejandro Caballa Olivares, con código de estudiante N° 201520632, con DNI N° 71249456, con domicilio en Av. 1ro de mayo 1827, Nochetto, distrito El Agustino, provincia y departamento de Lima, y Juan Jose Fraga Rojas, con código de estudiante N° 201311042, con DNI N° 70078121, con domicilio en Mz F It 15 urb. El Cuadro, distrito Chaclacayo, provincia y departamento de Lima, en nuestra condición de bachilleres en Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería, declaramos bajo juramento que:

La presente tesis titulada: “Concreto fotocatalítico con adición de nanomateriales de dióxido de titanio para aumentar la durabilidad en elementos exteriores en edificaciones” es de nuestra única autoría, bajo el asesoramiento del docente Mg. Ing. Liliana Janet Chavarría Reyes, y no existe plagio y/o copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación presentado por cualquier persona natural o jurídica ante cualquier institución académica o de investigación, universidad, etc.; la cual ha sido sometida al antiplagio Turnitin y tiene el 25% de similitud final.

Dejamos constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en la tesis, el contenido de estas corresponde a las opiniones de ellos, y por las cuales no asumo responsabilidad, ya sean de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o de internet.

Asimismo, ratificamos plenamente que el contenido íntegro de la tesis es de nuestro conocimiento y autoría. Por tal motivo, asumimos toda la responsabilidad de cualquier error u omisión en la tesis y somos conscientes de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de falsa declaración, nos sometemos a lo dispuesto en las normas de la Universidad Ricardo Palma y a los dispositivos legales nacionales vigentes.

Surco, 20 de octubre de 2023



Carlos Alejandro Caballa Olivares

(DNI N°) 71249456



Juan Jose Fraga Rojas

(DNI N°) 70078121

## INFORME DE ORIGINALIDAD - TURNITIN

Concreto fotocatalítico con adición de nanomateriales de dióxido de titanio para aumentar la durabilidad en elementos exteriores en edificaciones

### INFORME DE ORIGINALIDAD

25%

INDICE DE SIMILITUD

24%

FUENTES DE INTERNET

7%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

### FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://repositorio.urp.edu.pe">repositorio.urp.edu.pe</a> Fuente de Internet	7%
2	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	5%
3	Submitted to Universidad Ricardo Palma Trabajo del estudiante	3%
4	Submitted to pontificiabolivariana Trabajo del estudiante	1%
5	<a href="http://eprints.uanl.mx">eprints.uanl.mx</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="http://www.scielo.cl">www.scielo.cl</a> Fuente de Internet	<1%
7	<a href="http://hrcak.srce.hr">hrcak.srce.hr</a> Fuente de Internet	<1%
8	<a href="http://repositorio.utea.edu.pe">repositorio.utea.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%

Dra. Vargas Chang Esther Joni

## **DEDICATORIA**

A mis amados padres, cuyo apoyo constante desde mis primeros pasos ha sido el cimiento de mi crecimiento y desarrollo. A mi hermano, como un reflejo de que la tenacidad y el triunfo son parte de nuestro linaje. Y a mis abuelos, cuya satisfacción continua en mis éxitos ha sido un estímulo inagotable. Esta tesis es un homenaje a todos ustedes.

Carlos Alejandro Caballa Olivares

A mi Padre Celestial por darme la oportunidad de crecer profesionalmente y el gozo que me da por estar presente en mis decisiones. Agradezco a mis padres por su apoyo incondicional, a mi hermano por motivarme a seguir adelante, a mi esposa por ser mi soporte e inspiración y a mi hija quién estuvo alegrándose en cada momento y a todos quienes me ayudaron a no rendirme y seguir adelante, por ser mis principales motivadores que me aconsejaron a superar los obstáculos, por su amor y cariño.

Juan Jose Fraga Rojas

## **AGRADECIMIENTO**

Damos gracias a Dios por brindarnos salud y sabiduría durante el desarrollo de este proceso. Expresamos nuestro reconocimiento a nuestra querida Universidad Ricardo Palma, por las innumerables experiencias y aprendizajes que adquirimos durante nuestro tiempo allí. Extendemos nuestro agradecimiento a nuestros mentores, la Mg. Ing. Liliana Janet Chavarría Reyes y al Dr. Ing. Carlos Magno Chavarry Vallejos, por su apoyo constante en nuestra investigación para obtener el título de Ingeniero Civil.

Carlos Alejandro Caballa Olivares

Juan Jose Fraga Rojas

## ÍNDICE GENERAL

METADATOS COMPLEMENTARIOS .....	ii
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD .....	iii
INFORME DE ORIGINALIDAD - TURNITIN.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
ÍNDICE GENERAL .....	vii
ÍNDICE DE TABLA .....	xi
ÍNDICE DE FIGURA.....	xiii
RESUMEN .....	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. Descripción de la realidad problemática.....	2
1.1.1. Problema e importancia.....	2
1.1.2. Árbol del problema .....	3
1.2. Formulación del problema .....	3
1.2.1. Problema general.....	3
1.2.2. Problemas específicos .....	3
1.3. Objetivos de la investigación.....	4
1.3.1. Objetivo general .....	4
1.3.2. Objetivos específicos .....	4
1.4. Delimitación de la investigación.....	4
1.4.1. Geográfica .....	4
1.4.2. Temporal .....	4
1.4.3. Temática.....	4
1.4.4. Muestral.....	5
1.5. Justificación del estudio.....	5
1.5.1. Conveniencia.....	5
1.5.2. Relevancia social.....	5
1.5.3. Aplicaciones prácticas.....	5
1.5.4. Unidad metodológica .....	5
1.5.5. Valor teórico.....	5

1.6.	Importancia del estudio.....	6
1.6.1.	Nuevos conocimientos .....	6
1.6.2.	Aporte.....	6
1.7.	Limitaciones del estudio .....	6
1.7.1.	Falta de estudios previos de investigación .....	6
1.7.2.	Metodológicos o prácticos .....	6
1.7.3.	Medidas para la recolección de los datos .....	6
1.7.4.	Obstáculos en la investigación .....	6
1.8.	Alcance .....	7
1.9.	Viabilidad del estudio .....	7
	<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>8</b>
2.1.	Marco histórico .....	8
2.2.	Investigaciones relacionadas con el tema .....	8
2.2.1.	Investigaciones internacionales.....	8
2.2.2.	Investigaciones nacionales .....	9
2.2.3.	Artículos relacionados con el tema .....	10
2.3.	Estructura teórica y científica que sustenta el estudio .....	13
2.3.1.	Fotocatálisis.....	13
2.3.2.	Concreto fotocatalítico .....	15
2.3.3.	Dióxido de titanio.....	16
2.3.4.	Durabilidad del Concreto .....	17
2.3.5.	Reforzamiento estructural .....	21
2.3.6.	Fisuras en elementos estructurales .....	22
2.3.7.	Vida útil de una estructura .....	23
2.3.8.	American Society for Testing and Materials (ASTM).....	23
2.3.9.	American Concrete Institute (ACI).....	23
2.3.10.	Norma Técnica Peruana (NTP) .....	23
2.4.	Definición de terminas básicos .....	24
2.5.	Fundamentos teóricos que sustentan las hipótesis .....	24
	<b>CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS Y VARIABLES .....</b>	<b>25</b>
3.1.	Hipótesis .....	25
3.1.1.	Hipótesis general .....	25
3.1.2.	Hipótesis específicas .....	25
3.2.	Sistema de variables.....	25

3.2.1.	Definición conceptual .....	25
3.2.2.	Definición operacional .....	26
3.2.3.	Operacionalización de las variables .....	27
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....		28
4.1.	Método de la investigación .....	28
4.2.	Tipo de la investigación .....	28
4.3.	Nivel de investigación .....	28
4.4.	Diseño de la investigación .....	29
4.5.	Población y muestra.....	29
4.5.1.	Población.....	29
4.5.2.	Muestra.....	29
4.6.	Técnicas e instrumentación de recolección de datos .....	29
4.6.1.	Instrumento de recolección de datos .....	29
4.6.2.	Métodos y técnicas .....	29
4.7.	Descripción de procesamientos de análisis.....	30
CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN .....		31
5.1.	Resultados de la investigación .....	31
5.1.1.	Resultados de los porcentajes de nanopartículas de TiO <sub>2</sub> para reducir los poros capilares del concreto fotocatalítico.....	31
5.1.2.	Resultados de los porcentajes de nanopartículas de TiO <sub>2</sub> para reducir la absorción de iones de cloruro del concreto fotocatalítico.....	41
5.1.3.	Resultados de los porcentajes de nanopartículas de TiO <sub>2</sub> para incrementar la resistencia a la compresión del concreto fotocatalítico.....	50
5.1.4.	Resultados de los porcentajes de nanopartículas de TiO <sub>2</sub> para incrementar la resistencia a la flexión del concreto fotocatalítico .....	64
5.2.	Contrastación de hipótesis .....	75
5.2.1.	Contrastación de la primera hipótesis .....	75
5.2.2.	Contrastación de la segunda hipótesis.....	77
5.2.3.	Contrastación de la tercera hipótesis.....	79
5.2.4.	Contrastación de la cuarta hipótesis.....	81
DISCUSIÓN .....		83
CONCLUSIONES .....		85
RECOMENDACIONES.....		87

REFERENCIAS.....	88
ANEXOS .....	93
Anexo A: Matriz de consistencia.....	93
Anexo B: Matriz de Revisión Bibliográfica .....	94
Anexo C: Relación entre subtemas y objetivos .....	98
Anexo D: Matriz de Relación entre subtemas y las referencias bibliográficas .....	99

## ÍNDICE DE TABLA

<b>Tabla 1</b> Operacionalización de variables .....	27
<b>Tabla 2</b> Artículos de reducción de poros capilares .....	31
<b>Tabla 3</b> Proporciones de mezcla de hormigones ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) .....	32
<b>Tabla 4</b> Porosidades de los hormigones .....	32
<b>Tabla 5</b> Proporciones de mezcla de hormigones ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) .....	34
<b>Tabla 6</b> Porcentaje de absorción de agua en hormigón adicionado nano- $\text{TiO}_2$ .....	34
<b>Tabla 7</b> Proporción de mezcla de concreto agregado con nano- $\text{TiO}_2$ .....	35
<b>Tabla 8</b> Absorción y porosidad aparente del concreto agregado con nano- $\text{TiO}_2$ .....	35
<b>Tabla 9</b> Proporción de la mezcla de hormigón con nano- $\text{TiO}_2$ .....	37
<b>Tabla 10</b> Porcentaje de absorción de agua de la mezcla de hormigón con nano- $\text{TiO}_2$ .....	37
<b>Tabla 11</b> Propiedades de los poros de la mezcla de hormigón con nano- $\text{TiO}_2$ .....	38
<b>Tabla 12</b> Proporción de la mezcla de hormigón con nano- $\text{TiO}_2$ .....	39
<b>Tabla 13</b> Proporción de la mezcla de hormigón con nano- $\text{TiO}_2$ .....	40
<b>Tabla 14</b> Artículos de reducción de absorción de iones de cloruro .....	41
<b>Tabla 15</b> Proporciones de mezcla de hormigones ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) .....	42
<b>Tabla 16</b> Resultados de ensayo de permeabilidad a los cloruros de los hormigones ...	42
<b>Tabla 17</b> Proporciones de mezcla de hormigones ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) .....	44
<b>Tabla 18</b> Velocidades de erosión de PC y NC .....	44
<b>Tabla 19</b> Velocidades promedio de erosión de PC y NC .....	44
<b>Tabla 20</b> Proporción de mezcla de concreto agregado con nanopartículas de $\text{TiO}_2$ .....	46
<b>Tabla 21</b> Penetración de cloruro a la mezcla de hormigón .....	46
<b>Tabla 22</b> Detalles de mezcla para hormigones con nano- $\text{TiO}_2$ .....	47
<b>Tabla 23</b> Coeficiente de migración de cloruros para mezclas de concreto .....	48
<b>Tabla 24</b> Artículos de resistencia a la compresión .....	50
<b>Tabla 25</b> Proporciones de mezcla de hormigones ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) .....	51
<b>Tabla 26</b> Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa) .....	51
<b>Tabla 27</b> Proporción de la mezcla de hormigones adicionados con $\text{TiO}_2$ .....	52
<b>Tabla 28</b> Resistencia a la compresión a los 7, 28 y 90 días (MPa) .....	53
<b>Tabla 29</b> Proporciones de mezcla de hormigones ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) .....	54
<b>Tabla 30</b> Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa) .....	54
<b>Tabla 31</b> Proporción de mezcla de concreto agregado con nanopartículas de $\text{TiO}_2$ .....	55
<b>Tabla 32</b> Resistencia a la compresión a los 7, 28, 56 y 90 días (MPa) .....	56

<b>Tabla 33</b> <i>Proporción de la mezcla de hormigón con nano-TiO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</i> .....	58
<b>Tabla 34</b> <i>Resistencia a la compresión a los 2, 7 y 28 días (MPa)</i> .....	58
<b>Tabla 35</b> <i>Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)</i> .....	59
<b>Tabla 36</b> <i>Composición de las mezclas de hormigón con nano-TiO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</i> .....	61
<b>Tabla 37</b> <i>Resistencia a la compresión a los 7, 28 y 90 días (MPa)</i> .....	61
<b>Tabla 38</b> <i>Composición de las mezclas de hormigón con nano-TiO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</i> .....	62
<b>Tabla 39</b> <i>Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días (MPa)</i> .....	63
<b>Tabla 40</b> <i>Artículos de resistencia a la flexión</i> .....	64
<b>Tabla 41</b> <i>Proporciones de mezcla de hormigones (kg/m<sup>3</sup>)</i> .....	65
<b>Tabla 42</b> <i>Resistencia a la flexión a los 28 días (MPa)</i> .....	65
<b>Tabla 43</b> <i>Proporción de la mezcla de hormigones adicionados con TiO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</i> .....	66
<b>Tabla 44</b> <i>Resistencia a la flexión a los 7, 28 y 90 días (MPa)</i> .....	67
<b>Tabla 45</b> <i>Proporción de mezcla de concreto agregado con nano-TiO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</i> .....	68
<b>Tabla 46</b> <i>Resistencia a la flexión a los 7, 28, 56 y 90 días (MPa)</i> .....	68
<b>Tabla 47</b> <i>Proporción de la mezcla de hormigón con nano-TiO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</i> .....	70
<b>Tabla 48</b> <i>Resistencia a la flexión a los 2, 7 y 28 días (MPa)</i> .....	71
<b>Tabla 49</b> <i>Composición de las mezclas de hormigón con nano-TiO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</i> .....	72
<b>Tabla 50</b> <i>Resistencia a la flexión a los 28 días (MPa)</i> .....	72
<b>Tabla 51</b> <i>Composición de las mezclas de hormigón con nano-TiO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</i> .....	73
<b>Tabla 52</b> <i>Resistencia a la flexión a los 7 y 28 días (MPa)</i> .....	74

## ÍNDICE DE FIGURA

<b>Figura 1</b> <i>Árbol de problemas</i> .....	3
<b>Figura 2</b> <i>Reacción de la Fotocatálisis</i> .....	14
<b>Figura 3</b> <i>Esquema de bandas de energía</i> .....	15
<b>Figura 4</b> <i>Ejemplo del Concreto Fotocatalítico</i> .....	16
<b>Figura 5</b> <i>Fases del Dióxido de Titanio</i> .....	17
<b>Figura 6</b> <i>Causas de la pérdida de durabilidad y del deterioro</i> .....	18
<b>Figura 7</b> <i>Esquema de tipos de rotura</i> .....	19
<b>Figura 8</b> <i>Ensayo a flexión de vigas con cargas a los tercios</i> .....	20
<b>Figura 9</b> <i>Causas de intervención</i> .....	22
<b>Figura 10</b> <i>Tipos de intervención posibles</i> .....	22
<b>Figura 11</b> <i>Fundamento teórico</i> .....	24
<b>Figura 12</b> <i>Porosidad de los hormigones</i> .....	33
<b>Figura 13</b> <i>Absorción de agua de los hormigones</i> .....	34
<b>Figura 14</b> <i>Porosidad de los hormigones</i> .....	36
<b>Figura 15</b> <i>Absorción de agua de los hormigones</i> .....	36
<b>Figura 16</b> <i>Absorción de agua de los hormigones</i> .....	38
<b>Figura 17</b> <i>Porosidad de los hormigones</i> .....	39
<b>Figura 18</b> <i>Porosidad de los hormigones</i> .....	40
<b>Figura 19</b> <i>Reducción a la absorción de iones de cloruros</i> .....	43
<b>Figura 20</b> <i>Velocidad promedio de erosión en agua y en solución de cloruro</i> .....	45
<b>Figura 21</b> <i>Porcentaje promedio de erosión en agua y en solución de cloruro</i> .....	45
<b>Figura 22</b> <i>Porcentaje promedio de reducción de absorción de iones de cloruro</i> .....	47
<b>Figura 23</b> <i>Coeficiente de migración de cloruros</i> .....	49
<b>Figura 24</b> <i>Porcentaje de reducción de absorción de iones de cloruro</i> .....	49
<b>Figura 25</b> <i>Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)</i> .....	52
<b>Figura 26</b> <i>Resistencia a la compresión a los 7, 28 y 90 días (MPa)</i> .....	53
<b>Figura 27</b> <i>Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)</i> .....	55
<b>Figura 28</b> <i>Resistencia a la compresión a los 7, 28, 56 y 90 días (MPa)</i> .....	57
<b>Figura 29</b> <i>Resistencia a la compresión a los 2, 7 y 28 días (MPa)</i> .....	59
<b>Figura 30</b> <i>Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)</i> .....	60
<b>Figura 31</b> <i>Resistencia a la compresión a los 7, 28 y 90 días (MPa)</i> .....	62
<b>Figura 32</b> <i>Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días (MPa)</i> .....	63

<b>Figura 33</b> Resistencia a la flexión a los 28 días (MPa).....	66
<b>Figura 34</b> Resistencia a la flexión a los 7, 28 y 90 días (MPa) .....	67
<b>Figura 35</b> Resistencia a la flexión a los 7, 28, 56 y 90 días (MPa) .....	69
<b>Figura 36</b> Resistencia a la flexión a los 2, 7 y 28 días (MPa) .....	71
<b>Figura 37</b> Resistencia a la flexión a los 28 días (MPa).....	73
<b>Figura 38</b> Resistencia a la flexión a los 7 y 28 días (MPa) .....	74
<b>Figura 39</b> Porosidad de las muestras de concreto.....	75
<b>Figura 40</b> Absorción de agua a los 28 días de las muestras de concreto.....	75
<b>Figura 41</b> Porcentaje de absorción de iones de cloruro de las muestras de concreto ..	77
<b>Figura 42</b> Resistencia a la compresión de los concretos a los 28 días (MPa) .....	79
<b>Figura 43</b> Resistencia a la flexión de los concretos a los 28 días (MPa).....	81

## RESUMEN

La presente tesis titulada “Concreto fotocatalítico con adición de nanomateriales de dióxido de titanio para aumentar la durabilidad en elementos exteriores en edificaciones” tuvo como objetivo determinar la adición de nanomateriales de dióxido de titanio para incrementar la durabilidad del concreto fotocatalítico, analizando específicamente los poros capilares, absorción de cloruro, resistencia a la compresión y a la flexión. El método que se empleó en esta investigación es deductivo, de tipo descriptivo, explicativo y correlacional debido a que se utilizaron datos experimentales recopilados de distintas investigaciones y de nivel descriptivo. El diseño es de carácter observacional, retrospectivo y longitudinal. Las nanopartículas de dióxido de titanio redujeron los poros capilares y la absorción de iones de cloruro, e incrementaron la resistencia a la compresión y a la flexión. El porcentaje óptimo para reducir los poros capilares estuvo en un rango de 0.5% al 4% de nanopartículas de dióxido de titanio, el 3% y el 4% de nanopartículas de dióxido de titanio redujo en un 58.2% la porosidad y en un 71.2% la absorción de agua respectivamente, el porcentaje óptimo para la reducción de absorción de iones de cloruro se encontró en un rango de 1% al 5%, siendo el 3% de nanopartículas de dióxido de titanio quien lo redujo en un 35.18%, con la adición de 1.5% de nanopartículas de dióxido de titanio se logró un incremento de 37.90% y 42.44% en la resistencia a la compresión y a la flexión respectivamente. Se concluye que la adición del nanomaterial de dióxido de titanio aumenta la durabilidad del concreto fotocatalítico.

*Palabras claves:* Dióxido de titanio, concreto fotocatalítico, porosidad, iones de cloruros, resistencia, nanomateriales.

## ABSTRACT

The present thesis titled “Photocatalytic concrete with the addition of titanium dioxide nanomaterials to increase durability in exterior elements in buildings” aimed to determine the addition of titanium dioxide nanomaterials to increase the durability of photocatalytic concrete, specifically analyzing capillary pores, chloride absorption, compressive strength, and flexural strength. The method used in this research is deductive, descriptive, explanatory, and correlational because experimental data collected from different investigations were used and it is descriptive. The design is observational, retrospective, and longitudinal. Titanium dioxide nanoparticles reduced capillary pores and chloride ion absorption, and increased compressive and flexural strength. The optimal percentage to reduce capillary pores was in a range of 0.5% to 4% titanium dioxide nanoparticles, 3% and 4% titanium dioxide nanoparticles reduced porosity by 58.2% and water absorption by 71.2% respectively, the optimal percentage for reducing chloride ion absorption was found in a range of 1% to 5%, with 3% titanium dioxide nanoparticles reducing it by 35.18%, with the addition of 1.5% titanium dioxide nanoparticles an increase of 37.90% and 42.44% was achieved in compressive strength and flexural strength respectively. It is concluded that the addition of titanium dioxide nanomaterial increases the durability of photocatalytic concrete.

*Keywords:* Titanium dioxide, photocatalytic concrete, porosity, chloride ions, resistance, nanomaterials.

## INTRODUCCIÓN

En un contexto global de creciente preocupación por la contaminación ambiental, la industria de la construcción se ve obligada a buscar alternativas para reducir el uso del cemento Portland, cuya producción contribuye a las emisiones de CO<sub>2</sub>. Una solución prometedora es la incorporación de nanomateriales en el diseño de mezclas de concreto, generando el concreto fotocatalítico, el cual tienen la capacidad de descomponer partículas contaminantes en el aire. Con el aporte descontaminante de la adición de nanomateriales, surge la interrogante sobre su contribución en las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad del concreto, debido a que en la actualidad los elementos estructurales se ven afectados por diversos factores ambientales y para lo cual la adición de nanopartículas mejora la vida útil de elementos exteriores en edificaciones. La innovación de nuevas tecnologías en la industria de la construcción fomenta la experimentación en nuevos campos en la adición de nanopartículas en las mezclas de concreto. A lo largo del tiempo, este tema ha sido objeto de numerosas investigaciones, por ejemplo, la adición del nanomaterial de dióxido de titanio a escala nanométrica, originando diversos estudios experimentales enfocados en analizar el comportamiento de este nanomaterial en dichas mezclas.

Se busca incrementar la durabilidad del concreto con la adición de nanomaterial de dióxido de titanio para lograr una mezcla descontaminante y de calidad para el sector construcción. Se analiza los diversos porcentajes de adición de nanopartículas de dióxido de titanio identificando porcentajes óptimos que permitan la reducción de los poros capilares y la absorción de cloruro, a su vez, el aumento de la resistencia a la compresión y a la flexión.

Esta investigación se encuentra conformada por seis capítulos; El capítulo I, contempla el planteamiento de problema, objetivos, delimitación, justificación, importancia y limitaciones del estudio. El capítulo II, describe el marco teórico donde se apoya de investigaciones nacionales, internacionales y artículos científicos relacionados con el tema. El capítulo III, desarrolla la formulación de las hipótesis y del sistema de variables. El capítulo IV, detalla la metodología de la investigación precisando el método, tipo, nivel y diseño de la investigación. El capítulo V, consiste en los resultados de la investigación y de la contrastación de las hipótesis, y finalmente se desarrolla la discusión, conclusiones y recomendaciones de la presente investigación.

## **CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. Descripción de la realidad problemática**

#### ***1.1.1. Problema e importancia***

Con el aumento de la contaminación ambiental en nuestro país y en el mundo, la industria de la construcción está en la obligación de tomar alternativas con tal de reducir el consumo de cemento Portland el cual aporta negativamente al cuidado del medio ambiente debido a la alta concentración de CO<sub>2</sub> que se genera en su fabricación. Abdalla et al. (2022) nos dice que anualmente se produce un promedio entre 5 a 6 mil millones de toneladas de cemento, estimando 1 tonelada de cemento por persona por año, si se requiere minimizar la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) esto es posible reduciendo el uso de cemento Portland.

Las estructuras poseen la capacidad de resistir diversas condiciones físicas y químicas a las que se ven expuestas durante su vida útil. Esta capacidad depende en gran medida de su durabilidad, la cual puede verse afectada por factores como la contaminación ambiental, ambientes marinos, suelos agresivos y las condiciones de servicio a las que se somete la estructura. Estos factores pueden causar daños estructurales y debilitamiento. Además, la durabilidad de una estructura puede verse influenciada por el diseño de la mezcla, la composición de los aditivos, el proceso constructivo y los materiales de construcción utilizados.

Al ubicarnos en un país sísmico, esto nos obliga a tener una alta durabilidad en nuestras estructuras con el fin de disminuir su vulnerabilidad ante los factores que alteran las propiedades internas y externas de la infraestructura, evitando posibles colapsos y mantenimiento constante de las mismas garantizando la integridad de las personas que lo habitan.

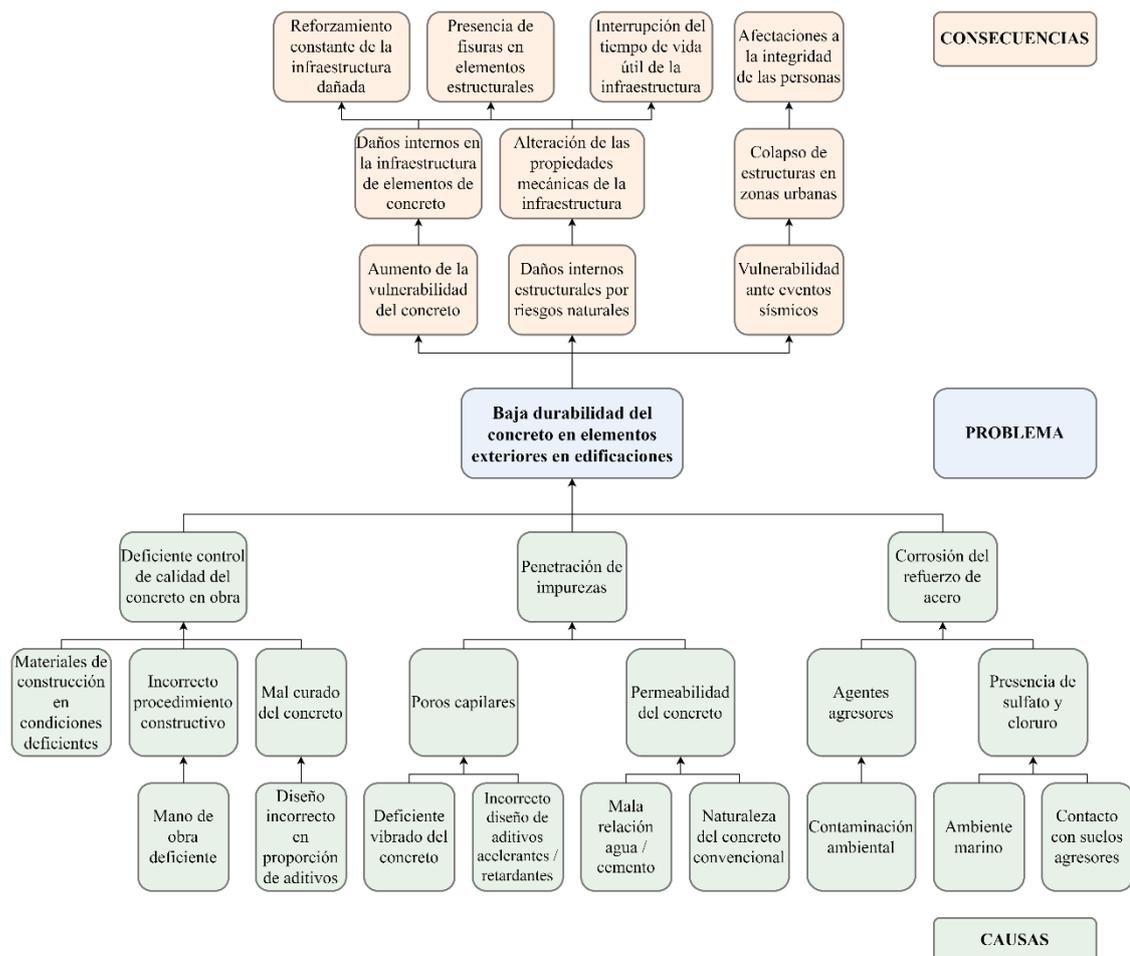
Con el paso del tiempo, las nanopartículas han ganado relevancia en el sector construcción, debido a su capacidad para mejorar la durabilidad de las estructuras frente a diversas condiciones. Un ejemplo es el dióxido de titanio, que puede incrementar la vida útil del concreto fotocatalítico y actuar como descontaminante. Por ello, este estudio se centrará en la adición de nanopartículas de dióxido de titanio para potenciar la durabilidad del concreto fotocatalítico.

### 1.1.2. *Árbol del problema*

En la Figura 1 se presenta el árbol de problemas, el cual nos será útil para visualizar y entender la naturaleza y contexto de la problemática que se pretende resolver en la presente tesis.

**Figura 1**

*Árbol de problemas*



*Nota.* Elaboración propia

## 1.2. Formulación del problema

### 1.2.1. *Problema general*

¿De qué manera la adición de nanomateriales de dióxido de titanio contribuye a la durabilidad del concreto fotocatalítico?

### 1.2.2. *Problemas específicos*

- ¿En qué medida el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio contribuye en los poros capilares del concreto fotocatalítico?

- b) ¿En qué medida el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio contribuye en la absorción de iones de cloruro del concreto fotocatalítico?
- c) ¿En qué medida el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio contribuye en la resistencia a la compresión del concreto fotocatalítico?
- d) ¿En qué medida el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio contribuye en la resistencia a la flexión del concreto fotocatalítico?

### **1.3. Objetivos de la investigación**

#### ***1.3.1. Objetivo general***

Determinar la adición de nanomateriales de dióxido de titanio para incrementar la durabilidad del concreto fotocatalítico.

#### ***1.3.2. Objetivos específicos***

- a) Determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio para reducir los poros capilares del concreto fotocatalítico.
- b) Determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio para reducir la absorción de iones de cloruro del concreto fotocatalítico.
- c) Determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio para incrementar la resistencia a la compresión del concreto fotocatalítico.
- d) Determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio para incrementar la resistencia a la flexión del concreto fotocatalítico.

### **1.4. Delimitación de la investigación**

#### ***1.4.1. Geográfica***

El presente proyecto de investigación se desarrollará en zonas con climas templados y suelos llanos.

#### ***1.4.2. Temporal***

El proyecto de investigación se desarrollará desde el mes de mayo a octubre del 2023.

#### ***1.4.3. Temática***

- Campo: Concreto fotocatalítico.
- Área académica: Ingeniería Civil.
- Línea de investigación: Tecnología del concreto.

- Sub línea de investigación: Construcción.

#### ***1.4.4. Muestral***

La unidad de análisis de la investigación fue estudiar distintos elementos de concreto ubicados en zonas urbanas, comparando en diversos proyectos de investigación tales como artículos y tesis científicas referente al tema en mención.

### **1.5. Justificación del estudio**

#### ***1.5.1. Conveniencia***

La presente tesis tiene como finalidad comprobar que la adición del nanomaterial de dióxido de titanio al concreto fotocatalítico no solo ayuda a la limpieza del medio ambiente, sino que también aporta mayor durabilidad a las infraestructuras siendo esta adición una variante de diseño de estructuras de concreto.

#### ***1.5.2. Relevancia social***

La investigación tiene un impacto positivo en la sociedad debido a que al adicionar un material fotocatalizador reduce la contaminación presente en la atmósfera proporcionando una mejor calidad de vida a los ocupantes de dichas infraestructuras.

#### ***1.5.3. Aplicaciones prácticas***

Debido a la contaminación ambiental actual y presencia de agentes agresores en ambientes marinos, la durabilidad del concreto de las estructuras en las edificaciones se ve afectada, esta investigación servirá para resolver el problema de la baja durabilidad del concreto, otorgando una mayor vida útil de la estructura reduciendo la frecuencia de reparaciones.

#### ***1.5.4. Unidad metodológica***

El presente proyecto de investigación consiste en una recopilación de investigaciones pasadas, como tesis y artículos científicos nacionales e internacionales, comparando y analizando cada caso particular.

#### ***1.5.5. Valor teórico***

Con la ayuda de esta investigación se propone un nuevo diseño de estructuras de concreto, que no solo trae consigo beneficios ambientales sino también de durabilidad, quedando

como recomendación realizar una evaluación de rentabilidad ante la implementación de dicho nanomaterial.

## **1.6. Importancia del estudio**

### ***1.6.1. Nuevos conocimientos***

Esta investigación nos demuestra como contribuye la adición de nanomateriales de dióxido de titanio a la durabilidad del concreto fotocatalítico.

### ***1.6.2. Aporte***

Demostrar que la añadidura de dióxido de titanio como nanomaterial para el concreto fotocatalítico nos otorga beneficios a la durabilidad de las estructuras.

## **1.7. Limitaciones del estudio**

### ***1.7.1. Falta de estudios previos de investigación***

Hoy en día se encuentran investigaciones de adiciones de nanomateriales, en la presente investigación se estudiará el dióxido de titanio, no existe mucha información a nivel nacional, sin embargo, a nivel internacional, existe información muy actualizada sobre este material en tesis y artículos científicos, quedando todavía algunas propiedades por investigar.

### ***1.7.2. Metodológicos o prácticos***

La bibliografía que hasta el momento se viene trabajando nos brinda información para cumplir los objetivos específicos y generales de la investigación.

### ***1.7.3. Medidas para la recolección de los datos***

Mediante una recolección de datos de tesis y artículos científicos de diversos autores nos brindan resultados favorables referente a la durabilidad, como, por ejemplo, la reducción de la permeabilidad, incremento de la resistencia mecánica, entre otros resultados de ensayos de laboratorio.

### ***1.7.4. Obstáculos en la investigación***

Al ser una investigación documental no experimental, no se realizaron ensayos de laboratorio de tecnología del concreto, por lo que no se pudo comprobar experimentalmente el aporte en adición del dióxido de titanio a la durabilidad del concreto fotocatalítico.

## **1.8. Alcance**

Este estudio examina el impacto del dióxido de titanio en la durabilidad del concreto fotocatalítico utilizado en elementos exteriores en edificaciones situados en zonas de clima templado. Se centra específicamente en la costa peruana, que comparten condiciones atmosféricas y meteorológicas similares.

## **1.9. Viabilidad del estudio**

- a) Tiempo: El periodo de investigación tendrá una duración de seis meses, comenzando en mayo del 2023 y finalizando en octubre del 2023.
- b) Espacio: La presente investigación se llevará a cabo en las edificaciones de la costa peruana.
- c) Condiciones económicas: Al ser una investigación documental, no se asumirá gastos de ensayos de laboratorio.
- d) Fuentes de información: Se utilizó documentos de investigación a nivel nacional e internacional.
- e) Recolección de datos: La información usada para la elaboración de la investigación se obtuvo de la base de datos académicas de la Universidad Ricardo Palma para artículos y tesis de nivel nacional e internacional.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Marco histórico

En el 1938 Doodeve y Kitchener descubrieron que el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) en contacto con el oxígeno ( $\text{O}_2$ ) empieza a actuar como un fotosensibilizador para los tintes blanqueadores, cuando la luz ultravioleta es absorbida por el  $\text{TiO}_2$  produce oxígeno activo en su superficie dando como resultado un proceso químico llamado la fotooxidación la cual sería la sería el primer avistamiento de la fotocatalisis (Xu et al., 2014).

Como bien menciona Berdun (2000, como se citó en Ramirez & Wesso, 2019) en 1967 Fujishima y Honda descubrieron la fotocatalisis mediante estudios que se basaron en semiconductores tales como  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Cds}$ ,  $\text{WO}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , mediante una reacción química entre el agua y dichos componentes, el dióxido de titanio presentó una estabilidad mayor y bajo grado de toxicidad.

A mediados del año 1990, la Asociación Ibérica de la Fotocatalisis descubre las propiedades antibacterianas y auto limpiante del dióxido de titanio además de la fotodegradación de  $\text{NO}_x$  por dicho componente, apareciendo 4 años más tarde la primera aplicación de la fotocatalisis en la industria de la construcción, siendo esta una cerámica con propiedades autolimpiables además de ser bactericida y fungicida (González, 2018).

### 2.2. Investigaciones relacionadas con el tema

#### 2.2.1. Investigaciones internacionales

Rangel & Molina (2020) tuvieron como objetivo general analizar las propiedades mecánicas y de durabilidad utilizando bajas dosificaciones de  $\text{TiO}_2$  en muestras de concreto, el cual mediante la Norma NTC 220, realizó cubos de concreto con diferentes dosificaciones de  $\text{TiO}_2$  para determinar la resistencia a la compresión, utilizando la norma NT BUILD 492 realizó cilindros de concreto perforados para determinar la resistencia a la penetración de iones de cloruro y el método de polarización lineal (RPL) para hallar la velocidad de corrosión.

En conclusión, las muestras de probetas llegaron a su resistencia ideal con la cantidad de 2% de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) debido a que está en proporción a la cantidad de cemento. Ramirez & Wesso (2019) en su investigación se plantean como objetivo general diseñar e implementar un fotorreactor para identificar patrones y rasgos de desempeño en concretos fotocatalítico simulando condiciones ambientales a largo plazo, destacando las muestras de concreto con adición de diferentes porcentajes de  $\text{TiO}_2$  (0%, 5%, 10%, 30%

y 60%), siendo estas sometidas a ensayos de compresión a los 7, 14 y 28 días.

De los resultados de la resistencia a la compresión se encontró una pérdida de resistencia a las muestras adicionadas con un porcentaje mayor al 10% de  $\text{TiO}_2$ .

### **2.2.2. Investigaciones nacionales**

Najar (2021) nos indica que su investigación tiene como objetivo determinar el porcentaje óptimo de dióxido de Titanio ( $\text{TiO}_2$ ) añadiendo al Cemento Yura Tipo I para la preparación de una mezcla de concreto en dosificación 1:3 (cemento : agua) y relación de agua cemento a/c 0.4 , teniendo en consideración el equilibrio y mejorar las propiedades físico – mecánicas en la preparación de adoquines tipo II de resistencia de 420 kg/cm<sup>2</sup> en la elaboración de adoquines con una relación de 0.0, 3.0, 7.0 y 12% de dióxido de Titanio. Se concluyó que la cantidad óptima de dióxido de Titanio agregado para la dosificación de concreto fue el de 7.0% al poder demostrar un equilibrio entre la resistencia a la compresión a los 3, 7 y 28 días de curado y capacidad fotocatalítica con Rodamina B.

Guillermo & Inocencio (2022) se centran en la propuesta de utilizar  $\text{TiO}_2$  en morteros que están directamente expuestos a una fuente de luz UV, con el objetivo de contribuir a la purificación del aire a través de la fotocatalisis. Evaluaron las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión, fluidez y absorción en morteros con contenido de  $\text{TiO}_2$  del 0%, 5%, 7.5% y 10%. Descubrieron que los especímenes con más del 5% de dióxido de titanio mostraban mejoras en estas propiedades. Para el ensayo de purificación del aire, tomaron seis muestras de cada diseño de mortero y determinaron su funcionalidad en términos de purificación del aire según los estándares de la norma UNI 11259:2016.

Bernuy & Flores (2020) investigaron la manera de como el fotocatalizador Dióxido de Titanio es capaz de desarrollar mejoras en las propiedades físicas y de purificación de mezclas de concreto, sus muestras se repartieron en distintas cantidades de  $\text{TiO}_2$  como 5%, 7.5% y 10% a muestras que se verán sometidas a distintos ensayos para los cuales se realizó de compresión y de fluidez, con un porcentaje de 5% como valor óptimo cumpliendo las expectativas de las cuales fueron favorables para determinar sin perjudicar el progreso y mejora física y química de un concreto fotocatalítico.

Medina (2017) determinó la influencia del dióxido de titanio como autolimpiantes y las mejoras en las propiedades mecánicas con agregados de distintas canteras de la ciudad de Cajamarca con grados en porcentaje del  $\text{TiO}_2$  como 5%, 10% y 15% en diferentes ensayos de reducción como de absorción, resistencia a la compresión y propiedad autolimpiable, de igual manera utilizó la prueba de Rodamina para constatar que realmente si se volvió

la mezcla de concreto en fotocatalítico y autolimpiante, se logró un porcentaje óptimo de 5% de  $\text{TiO}_2$  con fines de los cuales fue estudiado.

Coral (2022) evaluó el desempeño mecánico y fotocatalítico de un concreto hidráulico con la adición del fotocatalizador Dióxido de Titanio  $\text{TiO}_2$  para ser evaluada con la resistencia a la compresión y flexión con un determinado tiempo de 7, 14 y 28 días de curado con unas cantidades variantes por peso como 3%, 6% y 9% y de tal manera se realizaron otros ensayos más como un ensayo de autolimpieza, y la aplicación de Rodamina B, para poder visualizar si es un material fotocatalítico en escala colorimétrica.

### ***2.2.3. Artículos relacionados con el tema***

Rawat et al. (2023) examinaron el impacto de reemplazar parcialmente el cemento con dióxido de titanio nano (NT) en concreto. Se añadió NT a la calidad de concreto C20/25 en proporciones de 0 a 3% usando cemento puzolánico portland. El concreto fresco mostró una reducción del 54% en la caída con un reemplazo del 3%. Las resistencias a la compresión, flexión y tracción por división para el 1.5% de NT alcanzaron su punto máximo a los 90 días, luego disminuyeron. La adición de NT mejoró la homogeneidad e integridad del concreto, y a medida que aumentaba el porcentaje de NT, disminuía la penetración de cloruro.

Rawat et al. (2022) resumen que los recientes avances en nanotecnología han demostrado su potencial para mejorar la eficiencia de los materiales de construcción, como el concreto. Este estudio se centra en el uso de nanopartículas, específicamente el dióxido de titanio nano, para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del concreto. Se examinaron diversas propiedades del concreto, incluyendo resistencia mecánica y resistencia al fuego. Los resultados indican que la absorción de agua, la penetración de cloruro y la permeabilidad son bajas en los sistemas de cemento convencionales que contienen dióxido de titanio nano.

Zhang & Li (2011, como se citó en Rawat et al., 2022) en su estudio comparan la estructura de los poros y la permeabilidad al cloruro de concreto con nanopartículas ( $\text{TiO}_2$  y  $\text{SiO}_2$ ), fibras de polipropileno (PP) y ambos. La adición de nanopartículas refina la estructura de los poros y mejora la resistencia a la penetración de cloruro. Sin embargo, el concreto con fibras de PP tiene una estructura de poros más gruesa y menor resistencia a la penetración de cloruro. El concreto con nano- $\text{TiO}_2$  y PP tiene una estructura de poros más gruesa y menor resistencia a la penetración que el concreto solo con PP. Existe una relación hipérbolica entre la permeabilidad al cloruro y la resistencia a la compresión del

concreto, y una relación lineal entre la permeabilidad al cloruro y la estructura de los poros.

Nazari et al. (2010, como se citó en Rawat et al., 2022) investigaron la resistencia a la compresión y la trabajabilidad del concreto mediante el reemplazo parcial en peso de cemento con partículas de nanofase de  $\text{TiO}_2$  en contenidos diferentes (0.5%, 1%, 1.5% y 2%), los resultados mostraron que el uso de nanomateriales de  $\text{TiO}_2$  hasta un nivel máximo de 2% produce hormigón con una resistencia mejorada, sin embargo, la resistencia última del hormigón se obtuvo con un 1% de reemplazo de cemento.

Li et al. (2014, como se citó en Rawat et al., 2022) estudiaron la ventaja del hormigón que contiene nano- $\text{TiO}_2$  para resistir los efectos combinados de la difusión de cloruro, beneficiado por la mejora en la microestructura y la porosidad en comparación con el concreto puro, el concreto que contenía 1% de nano- $\text{TiO}_2$  en el peso del cemento mostró una mejor impermeabilidad y un mejor desempeño en resistir los efectos de la difusión de cloruro.

Soleymani (2012, como se citó en Rawat et al., 2022) investigó el efecto del agua de cal sobre la permeabilidad al agua del hormigón de mezcla binaria con nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  con sustitución parcial del cemento (0.5%, 1%, 1.5% y 2%) en peso, teniendo un curado en agua y agua de cal saturada durante 7, 28 y 90 días, indicando que las nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  hasta un nivel máximo de sustitución del 2% producen un hormigón con una permeabilidad al agua mejorada cuando se curan las muestras en agua de cal saturada con respecto a las muestras curadas con agua.

Nazari et al. (2010, como se citó en Rawat et al., 2022) estudiaron la resistencia dividida a tracción y flexión junto con el tiempo de fraguado del hormigón mediante la sustitución parcial en peso del cemento por partículas de  $\text{TiO}_2$  (0.5%, 1%, 1.5% y 2%) en nano fase, los resultados mostraron que la sustitución parcial del cemento por nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  en nanofase mejora la resistencia a la tracción y a la flexión del hormigón pero disminuye su tiempo de fraguado, obteniendo como resistencia última con un 1% de reemplazo de cemento.

Sharma et al. (2019) en su estudio se centraron en la sustitución parcial de cemento por aditivos minerales en concreto, específicamente cenizas volantes y nano-dióxido de titanio (NT). El uso de cenizas volantes reduce la resistencia a la compresión del concreto en las primeras etapas, pero esta pérdida puede compensarse con nanomateriales como el NT. El NT tiene propiedades fotocatalíticas que protegen el medio ambiente de gases nocivos y mejoran las propiedades del concreto. Este artículo investiga cómo la adición

de cenizas volantes (0%, 10%, 20%, 30%) y NT (0%, 1%, 1.5%, 2%) afecta la resistencia a la compresión del concreto. Los resultados podrían tener implicaciones significativas para la industria de la construcción en términos de rendimiento y sostenibilidad del concreto.

Li et al. (2018) mencionan que el dióxido de titanio nano (NT) es un material nano de dimensión cero que ha captado la atención debido a sus propiedades físicas y químicas únicas. Se ha demostrado que el NT puede modificar las estructuras de los materiales, lo que ofrece una nueva forma de desarrollar compuestos cementantes duraderos, de alto rendimiento, multifuncionales y respetuosos con el medio ambiente. Este artículo revisa la investigación sobre el efecto del NT en las propiedades de los compuestos cementantes. Se presentan detalles sobre el procesamiento, las microestructuras, las propiedades y las aplicaciones de los compuestos cementantes diseñados con NT. Finalmente, se discuten los riesgos, desafíos y el futuro desarrollo de estos compuestos.

Nazari & Riahi (2010, como se citó en Li et al., 2018) estudiaron el efecto de las nanopartículas de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) en las propiedades mecánicas del concreto de alta resistencia y autocompactante, utilizando porcentajes de  $\text{TiO}_2$  (1%, 2%, 3%, 4% y 5%) en la mezcla de concreto. Los resultados mostraron que la adición de  $\text{TiO}_2$  mejoró la resistencia a la compresión, flexión y permeabilidad al agua del concreto, teniendo como porcentaje óptimo una sustitución del 4% de  $\text{TiO}_2$ , disminuyendo ambas resistencias con adiciones por encima de este.

Sobhy et al. (2022) investigaron el efecto de agregar nanopartículas de molienda, nano  $\text{TiO}_2$  (NT) y nano ZnO (NZ), al concreto reforzado en porcentajes de 0.5%, 1% y 1.5% en peso de cemento. Las muestras con NT mostraron una mejora del 6% al 36% en resistencia a la compresión y del 8% al 27% en resistencia a la flexión. Sin embargo, las muestras con NZ presentaron un tiempo de desmoldeo más largo y una reducción en el grado de hidratación, afectando negativamente las propiedades mecánicas del concreto. A pesar de esto, la tasa de corrosión del 1% NZ fue mejor que la del 1.5% NT en un medio agresivo. En conclusión, los materiales en polvo NT y NZ pueden mejorar la vida útil del concreto.

Umamaheswari & Monisha (2019) estudiaron el efecto del dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) sobre la resistencia a la compresión y flexión del hormigón, utilizando diferentes porcentajes de  $\text{TiO}_2$  (0.5%, 1%, 1.5% y 2%) en hormigón M35, mostrando como resultado que la adición de  $\text{TiO}_2$  aumenta la resistencia a la compresión del hormigón alcanzando un valor máximo cuando se sustituye el 1.5% de  $\text{TiO}_2$ , pero a partir del reemplazo del 2% de  $\text{TiO}_2$

la resistencia disminuyó. En cuando a la resistencia a la flexión, se observó un aumento gradual con el aumento del porcentaje de  $\text{TiO}_2$ , alcanzando un máximo al 1.5% de reemplazo, concluyendo que la resistencia a la compresión y flexión se puede mejorar utilizando un porcentaje óptimo de  $\text{TiO}_2$ .

Joshaghani et al. (2020) evaluaron y compararon los efectos de diferentes nanopartículas, incluyendo dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), en las propiedades del concreto autocompactante (SCC) en términos de propiedades frescas, mecánicas y de durabilidad. Se utilizaron nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  con diámetros promedio de 18nm en dos contenidos diferentes del 3% y 5% en peso del cemento para diferentes relaciones a/c. Los resultados mostraron que la incorporación de nanopartículas mejoró la resistencia a la compresión y la durabilidad del SCC, además se encontró que el  $\text{TiO}_2$  tuvo el mayor efecto en la mejora de las propiedades del SCC. En conclusión, la incorporación de nanopartículas especialmente  $\text{TiO}_2$ , puede mejorar significativamente las propiedades del SCC.

Ren et al. (2022) estudiaron sobre los efectos de los nanomateriales en las características de poros y la resistencia a la compresión del concreto, el estudio utilizó nano- $\text{SiO}_2$  y nano- $\text{TiO}_2$  y se realizaron ensayos de saturación al vacío, porosimetría de intrusión de mercurio y microscopía electrónica de barrido, demostrando que los nanomateriales pueden reducir la porosidad del bloque de concreto en 15.6% y 3.5%, la porosidad del mortero de cemento en 34.7% y 16.6%, y la porosidad de ITZ en 92.0 % y 65,6%, respectivamente. Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión indicaron que, al reducir las porosidades, el nano- $\text{SiO}_2$  y el nano- $\text{TiO}_2$  pueden mejorar la resistencia a la compresión en un 15,79 % y un 9,22 %, respectivamente.

### **2.3. Estructura teórica y científica que sustenta el estudio**

#### **2.3.1. Fotocatálisis**

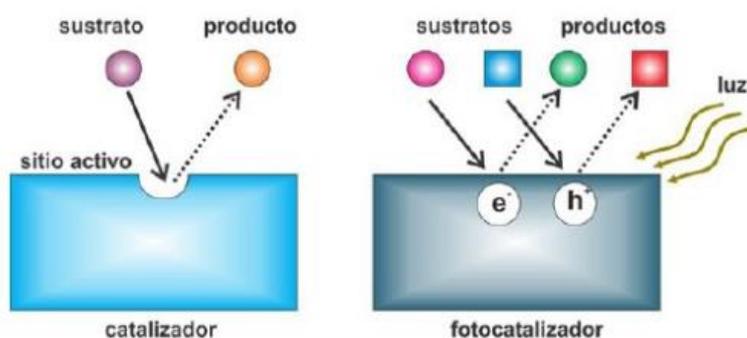
Es una reacción química como la oxidación que se produce la radiación UV altera y da inicio a un agente catalizador en conjunto con el oxígeno, dando como resultado la liberación y supresión de partículas agresivas, evitando la aglomeración de agentes no deseables y finalmente, absorbe las partículas contaminantes sobre la superficie en donde se da la reacción química (Ávila, 2018).

Según Faraldos (2012, como se citó en Pérez, 2021) la aplicación del dióxido de titanio en la actividad de fotocatálisis ha sido considerada como un avance en la ciencia de esterilización, desinfección y descontaminación, aplicado en elementos de concreto da

como resultado la limpieza del mismo, descontaminando su superficie cuando se ve actuado por la radiación solar, absorbiendo y eliminando los agentes contaminantes. Según Guarín (2011, como se citó en Segura & Camelo, 2019) es un proceso de oxidación por la reacción y aceleración de la fotorreacción por medio de un catalizador, el cual se activa por la absorción de la luz por la aceptación de electrones de la oxidación de los huecos, a consecuencia, el flujo neto de electrones resulta vacío o nulo generando reacciones de óxido que producen la degradación y mineralización de sustancia como se muestra en la siguiente Figura 2.

## Figura 2

### Reacción de la Fotocatálisis



Nota. Extraído de Nevárez et al. (2017)

Según Carp et al. (2004, como se citó en Coral, 2022) la fotocatálisis heterogénea es un proceso químico que el semiconductor es alterado a medida de la descarga de fotones de energía, originando oxidación y reducción de distintos compuestos inorgánicos y compuestos, siendo una tecnología química útil para la disminución de contaminantes del aire del entorno de las estructuras.

Proceso químico por el cual aumenta o disminuye la velocidad de reacción química al consumir el catalizador el cual origina el proceso y da curso a la expulsión de sustancias contaminantes considerando la influencia de una fuente luminosa y oxígeno para activar el catalizador (Ramírez & Wesso, 2019).

Según Definista (2016, como se citó en Ramírez & Wesso, 2019) se desencadena químicamente la reacción de los fotones donde las partículas conduce la radiación electromagnética, rayos x, luz infrarroja y microondas, cuando interactúan en la superficie haciendo que reaccione el catalizador originando activos oxidantes en una alta superficie y cristalinidad, teniendo una mayor claridad de los materiales semiconductores con propiedades eléctricas tal como muestra la siguiente Figura 3.

### Figura 3

Esquema de bandas de energía



Nota. Extraído de Ramirez & Wesso (2019)

#### 2.3.2. Concreto fotocatalítico

Se presenta como una reacción química entre partículas que conforman el concreto, tales como el cemento, agua y agregados, con un catalizador como es el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), para que logren en conjunto ser una estructura autolimpiantes en las impurezas superficiales que se ven influenciadas por la reacción química de la radiación UV como se aprecia en la Figura 4.

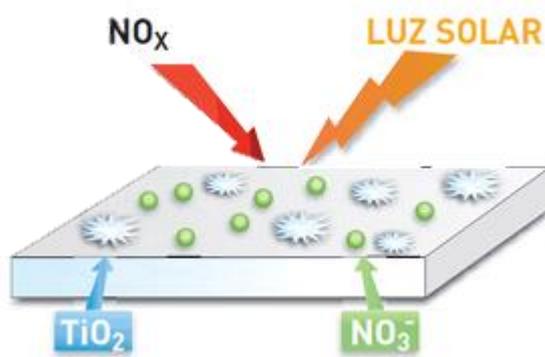
Según Faraldos (2012, como se citó en Pérez, 2021) da como concepto que la reacción fotoquímica que sufre una estructura de concreto mediante la transformación solar a energía química a consecuencia de la oxidación permite que se ejecute el proceso que logran la eliminación de impurezas, tales como  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{COVs}$ .

Según CONAMA (2012, como se citó en Najar, 2021) los materiales fotocatalíticos por la ventaja que tienen se utilizan en estructuras urbanas donde se presenta un grado considerable de contaminación por la emisión de  $\text{NO}_x$  por los vehículos, los materiales a los cuales se le han agregado Dióxido de Titanio ( $\text{TiO}_2$ ) absorben de manera artificial la contaminación eliminándola paulatinamente las superficies bloqueadas y de esta manera se cumple como catalizador por la limpieza de impurezas del contacto directo de las cuales fueron saturadas poniendo en peligro su propósito.

Según Rejinders (2009, como se citó en Najar, 2021) el dióxido de titanio en la mezcla de concreto da un gran favorecimiento como rendimiento fotocatalítico por la eliminación de  $\text{NO}_x$  al ser remplazado las partículas minúsculas de finos la cual le dan una superficie compacta poniendo en eficiencia la reacción química que le ayuda al avance.

## Figura 4

### Ejemplo del Concreto Fotocatalítico



Nota. Extraído de Gonzáles (2015)

### 2.3.3. Dióxido de titanio

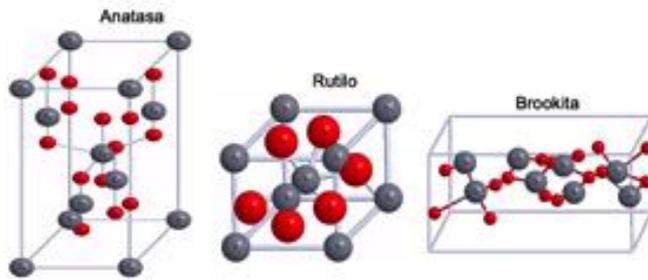
Según X Chen (2014, como se citó en Martínez et al., 2017) el dióxido de titanio es un elemento químico del cual se pueden encontrar de diferentes formas cristalográficas, tales como el rutilo, brookita y anastasa, goza de una estabilidad química, alta fotoestabilidad, actividad fotocatalítica, sin toxicidad muy superior al resto, por ende, es considerable su uso por su bajo costo, empleado en varias industrias.

Físicamente compuesto de un polvo fino blanco siendo un semiconductor sensible a la luz quien retiene y absorbe radiación electromagnética UV, estable químicamente, uso para la fabricación de pinturas, adhesivos, papel entre otros (Ramirez & Wesso, 2019).

Es un compuesto químico común en el mundo y de los más usados para diferentes industrias, siendo un elemento inorgánico de diámetro entre 200 y 300 nm, de color blanco en composición de polvo, utilizado comúnmente en la fabricación de pinturas, pegamentos, plásticos, cosméticos, entre otros, con una demanda en el mercado industrial que lo hacen uno de los más favorables e importantes, encontrado en su estado de óxid, incluyendo una variedad de minerales que contiene ilmenita, rutilo, anastasa y leucóxeno en tres fases diferentes como anastasa (tetragonal), el rutilo (tetragonal), y brokita (ortorómbica) como se aprecia en la Figura 5 respectivamente (Rangel & Molina, 2020).

## Figura 5

### *Fases del Dióxido de Titanio*



*Nota.* Extraído de Zarazua et al. (2017)

Según Rodríguez (2015, como se citó en Segura & Camelo, 2019) la composición química del Dióxido de Titanio ( $\text{TiO}_2$ ) que posee cuatro electrones en su estado de oxidación, la cual es la más estable y común, siendo de naturaleza covalente de una estructura cristalina hexagonal que es un gran conductor de electricidad y calor, resulta ser liviano a comparación de los otros metales como el hierro, teniendo similares propiedades mecánicas, posee la capacidad de ser resistente a la corrosión y sin duda es mucho mejor elemento químico para la industria.

#### **2.3.4. Durabilidad del Concreto**

La durabilidad del concreto se refiere a su capacidad de resistir la erosión, la abrasión, la acción química o cualquier agente de desgaste, a pesar de estar expuesto al medio ambiente, el concreto para ser durable debe conservar su forma, calidad y disponibilidad original (ACI (American Concrete Institute) Committee 210, 2001).

A pesar de la dificultad para realizar un estudio confiable sobre el origen de los problemas de durabilidad del concreto, se tienen algunos estudios que intentan darnos un panorama sobre la problemática española a principios de los años 80, siendo un 16.2% por la baja calidad de los materiales, un 38.5% debido a errores en los procesos constructivos y más del 40% en incorrectos diseños y/o cálculos como se aprecia en Figura 6 (Sanjuán & Castro, 2001).

**Figura 6**

*Causas de la pérdida de durabilidad y del deterioro*



*Nota.* Adaptado de Sanjuán & Castro (2001)

*a) Propiedades mecánicas*

a.1) Resistencia a la compresión

Según Riwa (2003, como se citó en Rodríguez, 2018) hace mención que se define como máximo esfuerzo que soporta un elemento antes de romperse, tal como el concreto tiene un grado de resistencia a los esfuerzos actuantes en el mismo para poder indicar su índice de calidad.

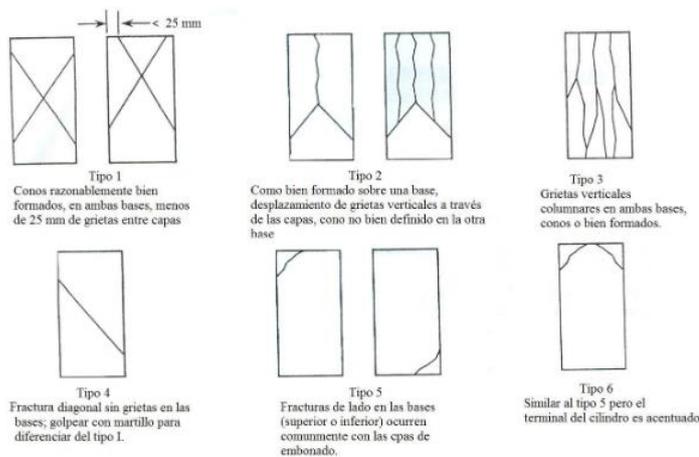
Según Rivva (2002, como se citó en Estela, 2020) la resistencia del concreto a la compresión de mide escalarmente dependiendo de los factores, tales como la mezcla, cemento y agua, la resistencia es favorable comprobarlo cuando se encuentra en estado sólido y no plástico para poder someter la estructura a ensayos de consistencia.

Según la Norma Técnica Peruana 339.034 que es referente al método de ensayo

normalizado de resistencia de la compresión para ver el control de calidad de los especímenes cilíndricos o por bloques preparados en proporciones y mezclado dependiendo de la dosificación para el cual fue diseñado, efectuando una carga sobre la estructura y ver su capacidad de resistencia y de tal modo ver el rango de cargas permisibles y punto de quiebre, ver Figura 7.

**Figura 7**

*Esquema de tipos de rotura*



*Nota.* Extraído de la Norma Técnica Peruana 339.034

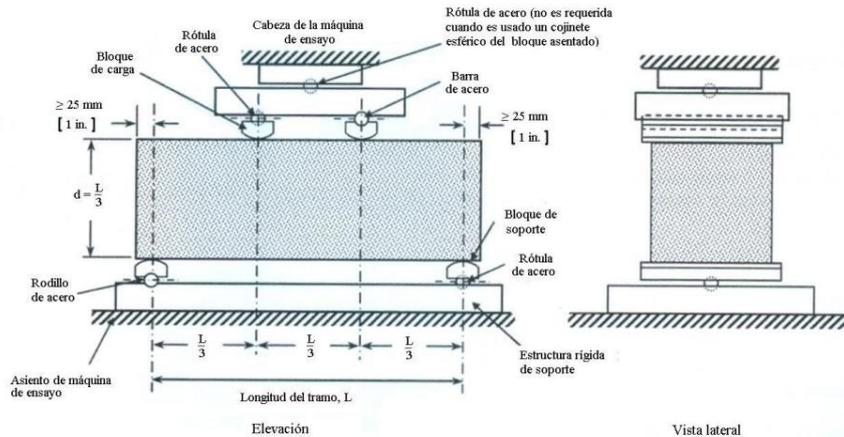
#### a.2) Resistencia a la flexión

Masías (2018) menciona sobre el cálculo de resistencia a la falla por momento del elemento estructural indirecta a la resistencia a la tracción, con influencia de su factor como aporte a la calidad del concreto y las variaciones en sus medidas de contracción, teniendo en cuenta las normas de ensayos NTP 339.078 o NTP 339.079, como carga de puntos tercios o punto medio respectivamente.

Según la Norma Técnica Peruana 339.078 se aplica una carga a la viga para calcular el módulo de rotura para poder analizar la capacidad de resistencia y la deriva de dimensión longitudinal como se observa en la Figura 8.

## Figura 8

### Ensayo a flexión de vigas con cargas a los tercios



Nota. Extraído de Norma Técnica Peruana 339.078

#### b) Absorción del concreto

Según Waddell (2001), la absorción es el cambio físico en incremento de masa de un elemento que ha absorbido agua y que ocupan los espacios de los poros en el interior de su estructura alterando su condición y de tal manera se puede determinar el peso y tiempo de contacto con el agua y sus variaciones de medición.

#### c) Congelamiento y deshielo

En países de clima continental la causa frecuente del deterioro del concreto es debido a los ciclos repetitivos de congelamiento-descongelamiento (Irassar, 2001, como se citó en Enfedaque et al., 2011).

El concreto con aire incorporado de buena calidad puede resistir ciclos de hielo-deshielo a lo largo de su vida útil, sin embargo, en condiciones climáticas extremas, dichos ciclos terminarían dañando al concreto de alta calidad por más que estos se encuentren en un óptimo estado de saturación total (ACI (American Concrete Institute) Committe 210, 2001).

#### d) Exposición a agentes químicos agresivos

El concreto presenta un comportamiento óptimo ante diferentes condiciones atmosféricas y exposiciones a agentes químicos, sea cuando este se encuentre sumergido en la mayoría de las aguas y suelos que contienen agentes agresores, pero a pesar de ellos existen ambientes químicos en donde se verá afectada la vida útil del concreto, provocando su

reducción a un tiempo más breve (ACI (American Concrete Institute) Committe 210, 2001).

*e) Abrasión*

La resistencia a la abrasión del concreto es la capacidad de una superficie para oponerse al desgaste por fricción y rozamiento, siendo los pisos y pavimentos afectados por abrasión debido al tránsito vehicular, además del tránsito constante de partículas por el agua o el viento también provocan la abrasión de las superficies de concreto (ACI (American Concrete Institute) Committe 210, 2001).

*f) Corrosión de los metales y otros materiales embebidos en hormigón*

Para lograr que el concreto tenga una larga vida útil se requiere proteger el acero de las armaduras y pretensado ante condiciones externas que provocan la corrosión, debido a que, si existe presencia de oxígeno y humedad, los iones de cloruro podrían acelerar el proceso de corrosión (ACI (American Concrete Institute) Committe 210, 2001).

La corrosión de las barras de refuerzo ocurre a causa de dos razones, debido a una alta concentración de cloruro u otros iones, o la alcalinidad del concreto disminuya debido a la interacción con substancia del medio exterior (Moreno, 2000, como se citó en Solís et al., 2005).

*g) Reacción química de los agregados*

Las reacciones químicas del agregado afectan el buen funcionamiento de los elementos de concreto, teniendo como consecuencia daños internos debido a expansiones anormales que podrían desencadenar fisuraciones, desplazamiento de elementos y pérdida de resistencia (Woods, 1968, como se citó en ACI (American Concrete Institute) Committe 210, 2001).

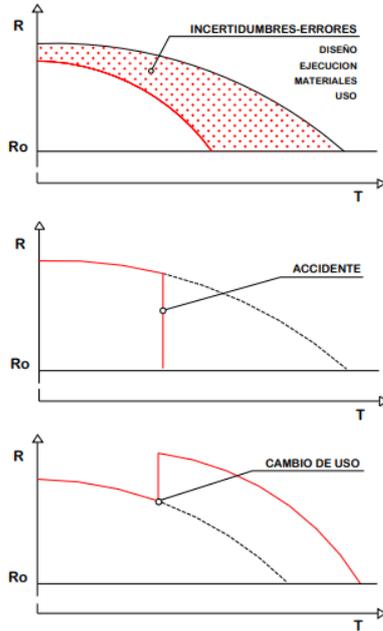
### **2.3.5. Reforzamiento estructural**

Al diseñar una estructura de concreto, esta debe proporcionar una resistencia que nos asegure unos márgenes de seguridad mínimos para una óptima vida útil, incluyendo ciertas pérdidas de resistencia a los largo de dicho tiempo como se aprecia en la Figura 9, sin embargo cada vez es más frecuente la intervención sobre las estructuras existentes con la finalidad de corroborar, conservar, reponer y/o aumentar su capacidad resistente, dependiendo del alcance y naturaleza del problema, dichas intervenciones habituales en

la práctica pueden incorporar una o varias de las siguientes tipos tal y como lo define el Comité Euro internacional del Hormigón en la Figura 10 (Río, 2008)

**Figura 9**

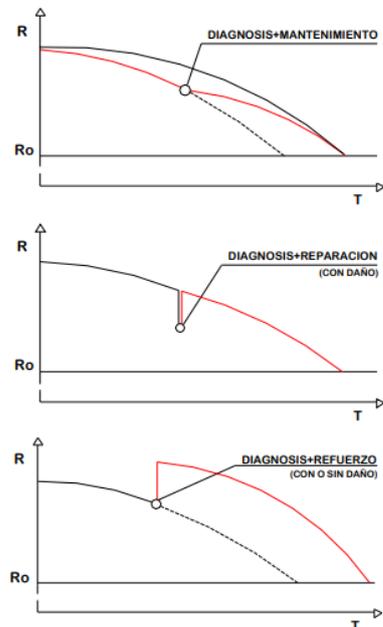
*Causas de intervención*



*Nota.* Extraído de Río Bueno (2008)

**Figura 10**

*Tipos de intervención posibles*



*Nota.* Extraído de Río Bueno (2008)

**2.3.6. Fisuras en elementos estructurales**

Las fisuras y grietas son roturas que se manifiestan como consecuencia de fuerzas de

tensión por encima de la capacidad resistente del concreto, entre las numerosas causas tenemos las de origen químico, sobre todo relacionadas a las variaciones de hidratación por parte del cemento o la oxidación del acero estructural, mientras que las de origen físico son los cambios de expansión y contracción que producen cambios volumétricos (Toirac, 2004).

### **2.3.7. Vida útil de una estructura**

La vida útil se define como el periodo en que la estructura conserva tres propiedades principales como seguridad, funcionalidad y estética por lo que, si la estructura careciera cualquiera de estas tres o requiera inesperados mantenimientos, podríamos decir que dicha estructura ya sobrepasó su periodo de vida útil (Cerna & Galicia, 2010).

### **2.3.8. American Society for Testing and Materials (ASTM)**

Se utilizarán las siguientes normas ASTM:

- ASTM C642: Método de prueba estándar para la determinación de densidad, absorción y vacíos en concreto endurecido.
- ASTM C1585: Método de prueba estándar para la medición de la tasa de absorción de agua por hormigones de cemento hidráulico.
- ASTM C1202: Método de prueba estándar para la indicación eléctrica de la capacidad del concreto para resistir la penetración de iones cloruro.
- ASTM C1152: Método de prueba estándar para cloruro soluble en ácido en concreto.
- ASTM C39: Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de concreto.
- ASTM C78: Método de prueba estándar para la resistencia a la flexión del concreto (utilizando viga simple con carga de tercer punto).
- ASTM C494: Especificación estándar para aditivos químicos para concreto.

### **2.3.9. American Concrete Institute (ACI)**

Se utilizará la siguiente norma ACI:

- ACI 201: Guía para la durabilidad del hormigón.

### **2.3.10. Norma Técnica Peruana (NTP)**

Se utilizarán las siguientes normas NTP:

- NTP 339.232: Método de ensayo para determinar la velocidad de absorción de agua

en concretos de cemento portland.

- NTP 339.034: Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas.
- NTP 339.078: Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión del concreto en vigas simplemente apoyadas con cargas a los tercios del tramo.
- NTP 339.079: Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión del concreto en vigas simplemente apoyadas con cargas en el centro del tramo.
- NTP 334.088: Aditivos químicos para concreto.

#### 2.4. Definición de terminos básicos

Dióxido de titanio: Fotocatalizador más usado en el concreto fotocatalítico, caracterizado principalmente por su no toxicidad.

Fotocatálisis: Surge mediante la reacción entre el fotocatalizador y los rayos UV transformando las sustancias que contaminan los edificios y el aire.

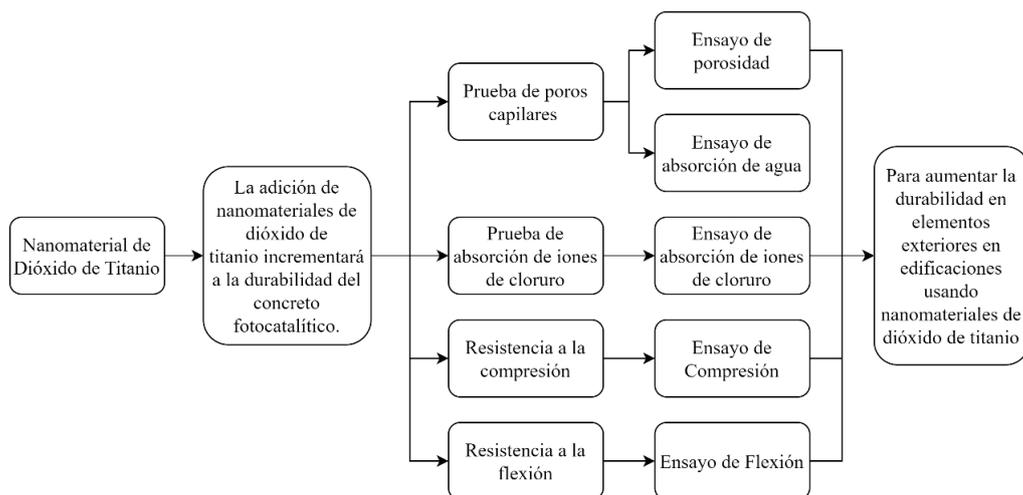
Durabilidad del concreto: Resistencia del concreto al desgaste por la meteorización, ataques químicos o cualquier proceso de deterioro que afecte a la vida útil de la estructura.

#### 2.5. Fundamentos teóricos que sustentan las hipótesis

En la Figura 11 se aprecia los fundamentos teóricos que sustentan la hipótesis.

**Figura 11**

*Fundamento teórico*



*Nota.* Elaboración propia

## CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS Y VARIABLES

### 3.1. Hipótesis

#### 3.1.1. *Hipótesis general*

La adición de nanomateriales de dióxido de titanio incrementa la durabilidad del concreto fotocatalítico

#### 3.1.2. *Hipótesis específicas*

- a) Al determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio se reducen los poros capilares del concreto fotocatalítico.
- b) Al determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio reduce la absorción de iones de cloruro del concreto fotocatalítico.
- c) Al determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio incrementa la resistencia a la compresión del concreto fotocatalítico.
- d) Al determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio incrementa la resistencia a la flexión del concreto fotocatalítico.

### 3.2. Sistema de variables

#### 3.2.1. *Definición conceptual*

- a) **Dióxido de titanio (Variable independiente):** Según Abella (2015, como se citó en Rangel & Molina, 2020) el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) es un material catalizador que reacciona ante la radiación ultra violeta por lo que inmediatamente se da inicio a la oxidación-reducción donde se presenta un cambio mediante sustancias sobre términos no ofensivos.

Como bien menciona Carbajo (2013, como se citó en Medina, 2017) el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) se caracteriza por ser proporcionalmente alta a la actividad fotocatalítica, teniendo una estabilidad superior con respecto a la fotocorrosión, no se ve afectada químicamente al contacto con otros compuestos y teniendo un grado de toxicidad baja.

- b) **Durabilidad del concreto (Variable dependiente):** Como bien menciona Diego (1993, como se citó en Rangel & Molina, 2020) la durabilidad del concreto es definida como la resistencia a los diferentes agente químicos y biológicos encontrados en el medio ambiente, tales como temperaturas extremas, ambientes

marinos, el clima, abrasión u otro cambio al que estará sometido la estructura durante su vida útil considerando desde su ejecución hasta la presencia de un cierto nivel razonable de deterioro.

### ***3.2.2. Definición operacional***

Para medir nuestras variables usaremos la Norma E.060 de concreto armado y la NTP 334.009 que se adaptará los estudios realizados de las diversas fuentes de investigaciones internacionales.

Se procederá a analizar las diversas fuentes de investigación y comparar con las normativas nacionales actuales para determinar la contribución de la adición de nanomaterial de dióxido de titanio a la durabilidad del concreto fotocatalítico.

### 3.2.3. Operacionalización de las variables

En la Tabla 1 se muestra el desarrollo completo de la operacionalización

**Tabla 1**

*Operacionalización de variables*

Variables	Dimensiones	Indicadores	Índices	Unidad de medida	Instrumentos	Herramientas	Ítems
VI: Nanomaterial de dióxido de titanio	Porcentaje de nanomaterial de dióxido de titanio	Porcentaje de nanomaterial de dióxido de titanio	Nanomaterial de dióxido de titanio en el concreto	%	Normas a nivel nacional e internacional, tesis de grado, publicaciones, investigaciones, entre otros.	ASTM C494 y NTP 334.088	
			Poros Capilares	Ensayo de porosidad			
VD: Durabilidad del concreto	Concreto endurecido	Absorción de iones de cloruro	Ensayo de absorción de agua	%	Normas a nivel nacional e internacional, tesis de grado, publicaciones, investigaciones, entre otros.	ASTM C1585 y NTP 339.232	Contenido de la tesis
			Ensayo de absorción de iones de cloruro	%			
			Ensayo de resistencia a la compresión	MPa			
			Ensayo de resistencia a la flexión	MPa			
		Resistencia a la compresión	Ensayo de resistencia a la compresión	MPa		ASTM C1202 y ASTM C1152	
		Resistencia a la flexión	Ensayo de resistencia a la flexión	MPa		ASTM C39 y NTP 339.034	
						ASTM C78, NTP 339.078 y NTP 339.079	

*Nota.* Elaboración propia

## **CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

La presente investigación documental/bibliográfica se enfoca en la recopilación, selección y análisis de información sobre la adición de nanomateriales de dióxido de titanio, para incrementar la durabilidad del concreto fotocatalítico, siendo este más impermeable y resistente, lo cual permitirá optimizar procesos y costos al emplearlos en la construcción. A través del análisis, se determinará el porcentaje óptimo a utilizar de nanomateriales de dióxido de titanio, en función de ciertos criterios. Finalmente, a partir de fuentes documentales, tales como artículos científicos, tesis, libros, entre otros; se organizará y se colocará la información más relevante mediante citas, tablas, figuras; las cuales sean importantes para el tema de investigación.

Las investigaciones revisadas siguen la metodología empleada por Chavarry et al. (2020), el cual se describe de la siguiente manera: método de la investigación deductivo, de orientación aplicada, enfoque cuantitativo, recaudando datos de forma retrolectiva, de tipo descriptivo, explicativo y correlacional, con un diseño experimental, longitudinal, y retrospectivo; siguiendo un estudio de cohorte.

### **4.1. Método de la investigación**

La metodología de investigación realizada es deductiva a consecuencia que se utilizaron datos de investigaciones pasadas, es aplicada ya que se quiere demostrar el aumento de la durabilidad del concreto fotocatalítico. Se utilizaron datos numéricos en recopilaciones encontradas, por lo que la investigación también fue cuantitativa y retroelectiva.

### **4.2. Tipo de la investigación**

La investigación será de tipo descriptivo, explicativo y correlacional, debido a que se utilizaron datos recopilados de distintas investigaciones con el objetivo de plantear soluciones a la baja durabilidad del concreto fotocatalítico por medio de la adición de nanomateriales de dióxido de titanio.

### **4.3. Nivel de investigación**

La investigación del presente estudio será de nivel descriptivo, ya que contrastaremos nuestras hipótesis por medio de cuadros y gráficos a base de datos obtenidos de investigaciones pasadas y también es correlacional debido a que se obtendrá una relación entre la cantidad de nanomaterial agregado al concreto fotocatalítico con el fin de

aumentar su durabilidad.

#### **4.4. Diseño de la investigación**

El diseño de la investigación es observacional, retrospectivo y longitudinal, ya que nuestra investigación no manipulará las variables, analizándolas en diferentes intervalos de tiempo, mediante información obtenida de investigaciones pasadas.

#### **4.5. Población y muestra**

##### **4.5.1. Población**

La población en esta parte de la investigación está sustentada con ayuda de tesis y artículos nacionales e internacionales con una antigüedad máxima de 5 años sobre el uso del dióxido de titanio en diversos campos de la ingeniería y construcción, presentando condiciones de uso para mejorar la durabilidad de las estructuras de concreto.

##### **4.5.2. Muestra**

Considerando a los ensayos ejecutados como parte de la información de las tesis y artículos científicos, nos permiten tener un mayor panorama con la aplicación del dióxido de titanio en distintos campos y situaciones para resultados de las pruebas de porosidad, absorción de agua, absorción de iones de cloruro, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión, de tal manera mejorar la durabilidad del concreto fotocatalítico.

#### **4.6. Técnicas e instrumentación de recolección de datos**

##### **4.6.1. Instrumento de recolección de datos**

- a) Scopus Preview.
- b) Science Direct.
- c) Alicia CONCYTEC.
- d) Repositorio URP.

##### **4.6.2. Métodos y técnicas**

- a) Técnica y/o método:
  - Recopilación de datos.
- b) Herramientas:
  - Norma Técnica Peruana.
  - Norma ASTM.

- Norma ACI
- c) Instrumentos:
  - Ficha de recolección de datos de investigaciones pasadas.
- d) Presentación del resultado:
  - Gráficos comparativos.
  - Histogramas.
  - Imágenes.
- e) Procesamiento:
  - Microsoft Excel

#### **4.7. Descripción de procesamiento de análisis**

A medida de cómo se fue recopilando la información de tesis pasadas cuyos autores hacen mención a los diferentes ensayos y análisis numéricos, se determinó el grado óptimo de adición de nanomateriales de dióxido de titanio mediante gráficos y cuadros comparativos. Dicha información obtenida fue desarrollada mediante el uso del software Microsoft Excel.

## CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

### 5.1. Resultados de la investigación

En el presente capítulo se abordará la recopilación de los diferentes artículos para poder determinar el porcentaje óptimo de nanomaterial de dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) empleado como sustituto parcial del cemento en la mezcla de concreto para cada uno de los objetivos planteados en la presente tesis.

#### 5.1.1. Resultados de los porcentajes de nanopartículas de TiO<sub>2</sub> para reducir los poros capilares del concreto fotocatalítico

En la Tabla 2 se muestran los artículos de reducción de poros capilares.

**Tabla 2**

*Artículos de reducción de poros capilares*

Ítem	Autor	Título	Relación a/c	Nanopartículas de TiO <sub>2</sub> (%)
2	Mao-hua Zhang, Hui Li	Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement	0.42	0, 1, 3 y 5
5	Farzad Soleymani	Assessments of the effects of limewater on water permeability of TiO <sub>2</sub> nanoparticles binary blended palm oil clinker aggregate-based concrete	0.40	0, 0.5, 1, 1.5 y 2
7	Garima Rawat, Sumit Gandhi, Yogesh Iyer Murthy	Durability Aspects of Concrete Containing Nano-Titanium Dioxide	0.50	0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 y 3
10	Ali Nazari, Shadi Riahi	The effect of TiO <sub>2</sub> nanoparticles on water permeability and thermal and mechanical properties of high strength self-compacting concrete	0.40	0, 1, 2, 3, 4 y 5
19	Jingge Ren, Xiaoxiao Luo, Ruiqiang Bai, Chonggen Pan, Jun Zhang	Pore characteristics of different phase in nano-modified concrete and their influences on the compressive strength	0.40	0, 1, 3 y 5

*Nota.* Elaboración propia

**Artículo 2:** Estructura de poros y permeabilidad a los cloruros del hormigón que contiene nanopartículas para pavimento (Zhang & Li, 2011, como se citó en Rawat et al., 2022).

- Tipo de cemento: Cemento Portland (P.O42.5).
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con pureza al 99.7% y en fase anatasa.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.42 con agregado fino de arena natural de río con un módulo de finura de 2.4, agregado grueso de diabase triturado con un diámetro de 5 a 30 mm, en la Tabla 3 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- Tipo de aditivos y adiciones: Se empleó un agente reductor de agua (UNF-5, un tipo de ácido b-naftaleno sulfónico y condensados de formaldehído) para ayudar a la dispersión de nanomateriales en la pasta de cemento y lograr una buena trabajabilidad del concreto, adicionalmente se usó un antiespumante (fosfato de tributilo) para disminuir la cantidad de burbujas de aire.
- En la Tabla 4 y Figura 12 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 3**

*Proporciones de mezcla de hormigones (kg/m<sup>3</sup>)*

Nanopartículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Agua	Cemento	Arena	Agregado Grueso	Nano-TiO <sub>2</sub>	UNF-5	Antiespumante
0	151	360	650	1260	-	5.4	-
1	151	356.4	650	1260	3.6	5.4	0.216
3	151	349.2	650	1260	10.8	7.2	0.288
5	151	342	650	1260	18	7.2	0.288

*Nota.* Extraído de Zhang & Li (2011, como se citó en Rawat et al., 2022).

**Tabla 4**

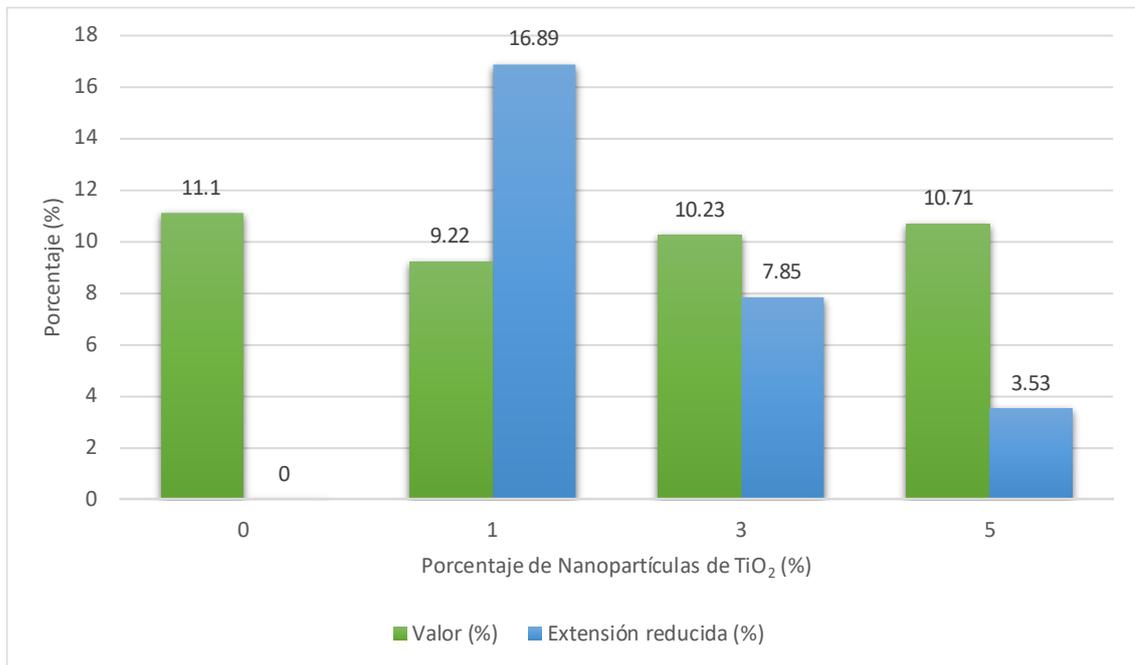
*Porosidades de los hormigones*

Nanopartículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Porosidad	
	Valor (%)	Extensión reducida (%)
0	11.1	0
1	9.22	16.89
3	10.23	7.85
5	10.71	3.53

*Nota.* Extraído de Zhang & Li (2011, como se citó en Rawat et al., 2022).

**Figura 12**

*Porosidad de los hormigones*



*Nota.* Adaptado de Zhang & Li (2011, como se citó en Rawat et al., 2022)

**Artículo 5:** Evaluaciones de los efectos del agua de cal en la permeabilidad al agua de nanopartículas de TiO<sub>2</sub> en concreto a base de agregados de clínker de aceite de palma de mezcla binaria (Soleymani, 2012, como se citó en Rawat et al., 2022).

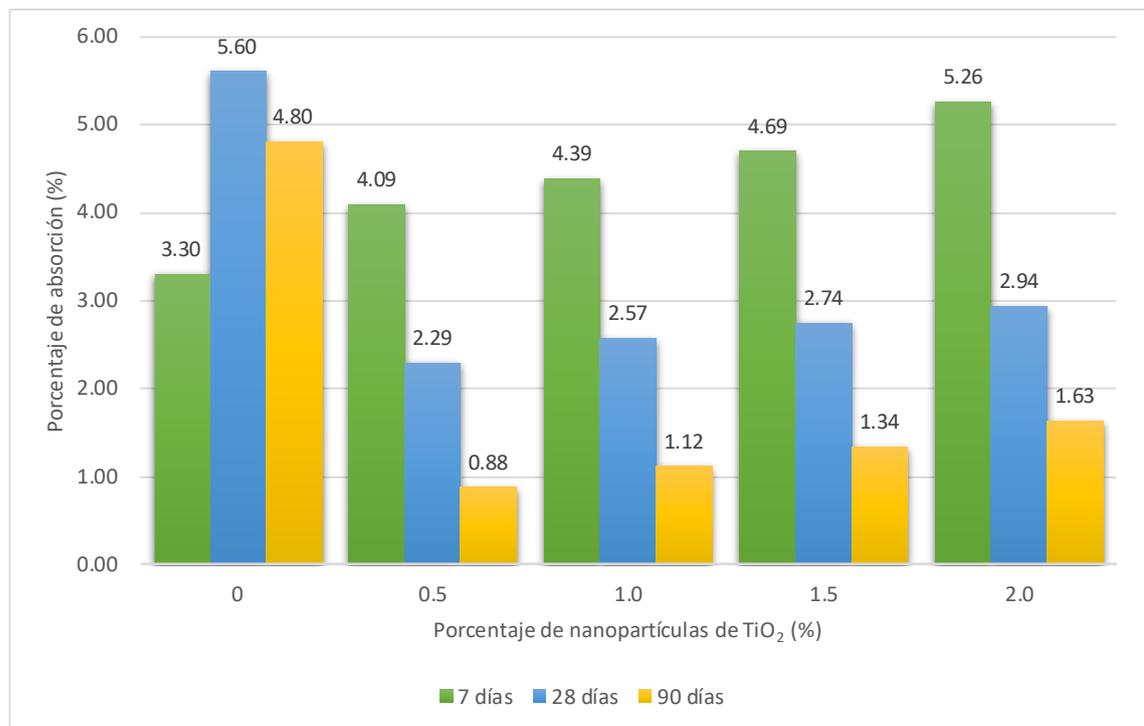
- Tipo de cemento: Cemento Portland ordinario (OPC) conforme a la norma ASTM C150.
- Características de las nanopartículas: Se utilizó nanopartículas de dióxido de titanio con un diámetro promedio de 15nm y una pureza del 99.9%.
- Diseño de mezcla: Relación a/c de 0.40 con agregado fino de arena fina y agregado grueso de basalto triturado, en la Tabla 5 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- En la Tabla 6 y Figura 13 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 5***Proporciones de mezcla de hormigones (kg/m<sup>3</sup>)*

Nano partículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Cantidades (kg/m <sup>3</sup> )	
	Cemento	Nano partículas de TiO <sub>2</sub>
0.0	450.00	0.00
0.5	447.75	2.25
1.0	445.50	4.50
1.5	443.25	6.75
2.0	441.00	9.00

*Nota.* Extraído de Soleymani (2012, como se citó en Rawat et al., 2022)**Tabla 6***Porcentaje de absorción de agua en hormigón adicionado nano-TiO<sub>2</sub>*

Nano partículas de TiO <sub>2</sub> (%)	7 días	28 días	90 días
0	3.30	5.60	4.80
0.5	4.09	2.29	0.88
1.0	4.39	2.57	1.12
1.5	4.69	2.74	1.34
2.0	5.26	2.94	1.63

*Nota.* Extraído de Soleymani (2012, como se citó en Rawat et al., 2022)**Figura 13***Absorción de agua de los hormigones**Nota.* Adaptado de Soleymani (2012, como se citó en Rawat et al., 2022)

**Artículo 7:** Aspectos de durabilidad del hormigón que contiene Nano-Dióxido de Titanio (Rawat et al., 2023).

- Tipo de cemento: Cemento Grado OPC 53.
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con pureza al 99.9% y en fase rutilo.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.50 con agregado fino de arena de río con un módulo de finura de 2.58, agregado grueso de basalto con un tamaño de partícula de menos de 20 mm, en la Tabla 7 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- Tipo de aditivos y adiciones: Se empleó un agente dispersante tripolifosfato de sodio (STPP) para dispersar las nanopartículas, que también funciona como una mezcla reductora de agua de alto rango (HRWRA).
- En la Tabla 8, Figura 14 y Figura 15 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 7**

*Proporción de mezcla de concreto agregado con nano-TiO<sub>2</sub>*

Reposición de cemento (%)	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Nano partículas de TiO <sub>2</sub>	Agua
0	385	695.57	1135.43	0	192
0.5	383.07	695.57	1135.43	1.92	192
1	381.15	695.57	1135.43	3.85	192
1.5	379.23	695.57	1135.43	5.77	192
2	377.3	695.57	1135.43	7.7	192
2.5	375.37	695.57	1135.43	9.62	192
3	373.45	695.57	1135.43	11.55	192

*Nota.* Extraído de Rawat et al. (2023)

**Tabla 8**

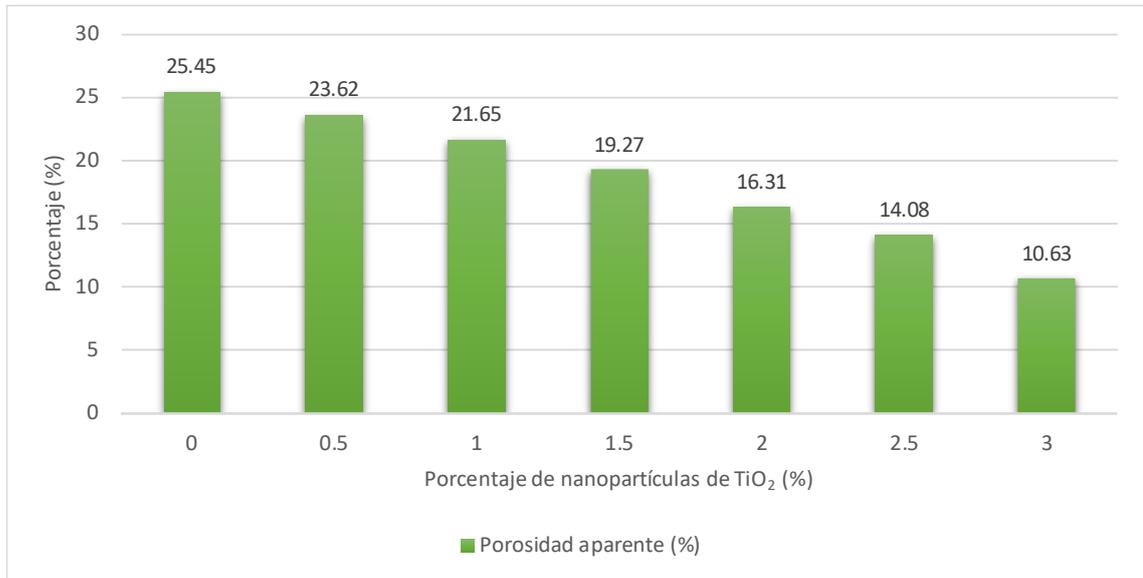
*Absorción y porosidad aparente del concreto agregado con nano-TiO<sub>2</sub>*

Nano partículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Sorción (mm/s <sup>0.5</sup> )	Absorción de agua (%)	Porosidad aparente (%)
0	0.0477	4.96	25.45
0.5	0.0409	4.89	23.62
1	0.0359	4.74	21.65
1.5	0.0369	4.64	19.27
2	0.0327	4.59	16.31
2.5	0.0231	4.45	14.08
3	0.0102	4.36	10.63

*Nota.* Extraído de Rawat et al. (2023)

**Figura 14**

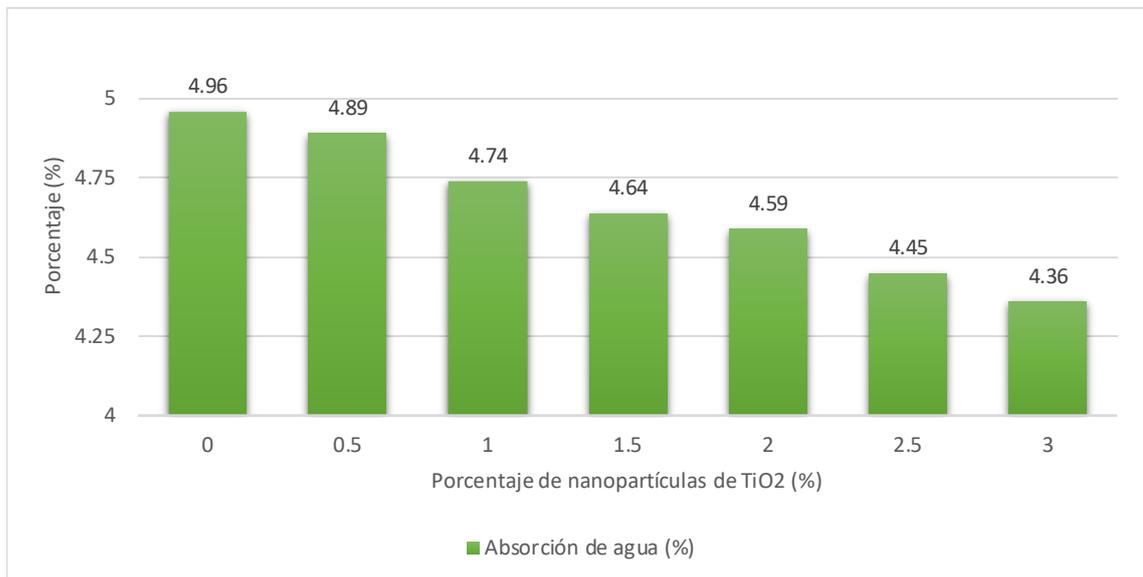
*Porosidad de los hormigones*



*Nota.* Adaptado de Rawat et al. (2023)

**Figura 15**

*Absorción de agua de los hormigones*



*Nota.* Adaptado de Rawat et al. (2023)

**Artículo 10:** El efecto de las nanopartículas de TiO<sub>2</sub> sobre la permeabilidad al agua y las propiedades térmicas y mecánicas del hormigón autocompactante de alta resistencia (Nazari & Riahi, 2010, como se citó en Li et al., 2018).

- Tipo de cemento: Cemento Portland ordinario (OPC) según la norma ASTM C150.
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con un tamaño promedio de 15nm, 45m<sup>2</sup>/g de finura y con pureza al 99.9%.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.40, se utilizaron áridos calizos triturados para producir hormigones autocompactantes, con grava 4/12 y dos tipos de arena: una gruesa 0/4, para áridos finos y otra 0/2, con un contenido alto de muy finos (tamaño de partícula < 0.063 mm) de 19.2% cuya función era aportar un mayor volumen de materiales finos para mejorar la estabilidad del hormigón fresco, en la Tabla 9 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- Tipo de aditivos y adiciones: Se empleó un policarboxilato con un aditivo a base de antiespumante de condensado de polietileno (1% en peso de mezcla).
- En la Tabla 10, Tabla 11, Figura 16 y Figura 17 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 9**

*Proporción de la mezcla de hormigón con nano-TiO<sub>2</sub>*

Nano partículas de TiO <sub>2</sub>	Contenido de PC (%)	Cantidades (kg/m <sup>3</sup> )	
		Cemento	Nano partículas de TiO <sub>2</sub>
0.0	1.0	450.00	0.00
1.0	1.0	445.50	4.50
2.0	1.0	441.00	9.00
3.0	1.0	437.50	13.50
4.0	1.0	432.00	18.00
5.0	1.0	427.50	22.50

*Nota.* Extraído de Nazari & Riahi (2010, como se citó en Li et al., 2018)

**Tabla 10**

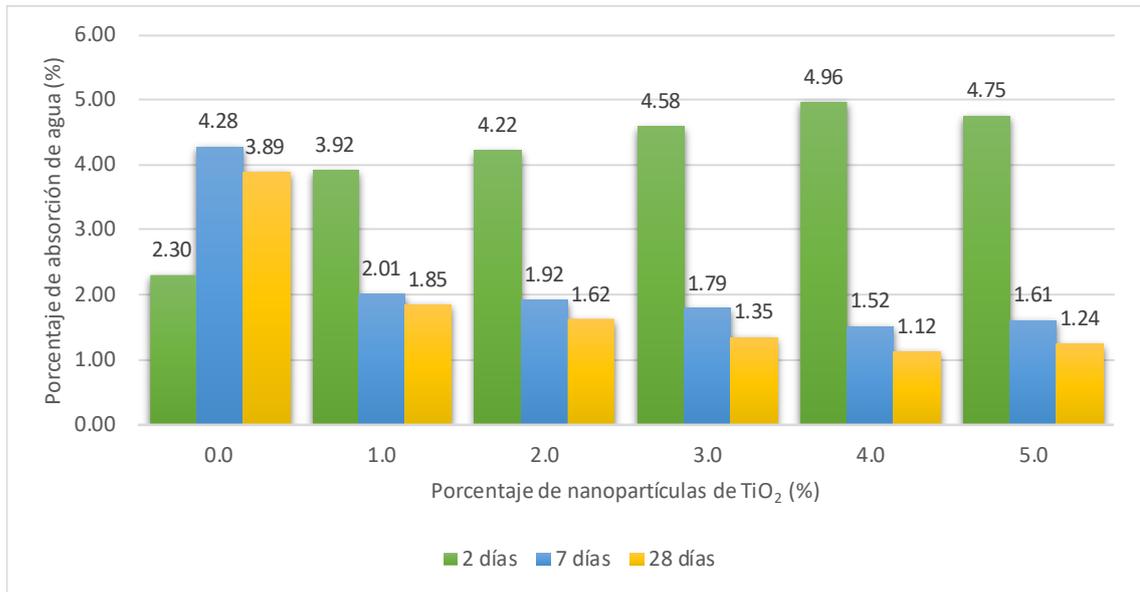
*Porcentaje de absorción de agua de la mezcla de hormigón con nano-TiO<sub>2</sub>*

Nano partículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Porcentaje de Agua Absorción (%)		
	2 días	7 días	28 días
0.0	2.30	4.28	3.89
1.0	3.92	2.01	1.85
2.0	4.22	1.92	1.62
3.0	4.58	1.79	1.35
4.0	4.96	1.52	1.12
5.0	4.75	1.61	1.24

*Nota.* Extraído de Nazari & Riahi (2010, como se citó en Li et al., 2018)

**Figura 16**

*Absorción de agua de los hormigones*



*Nota.* Adaptado de Nazari & Riahi (2010, como se citó en Li et al., 2018)

**Tabla 11**

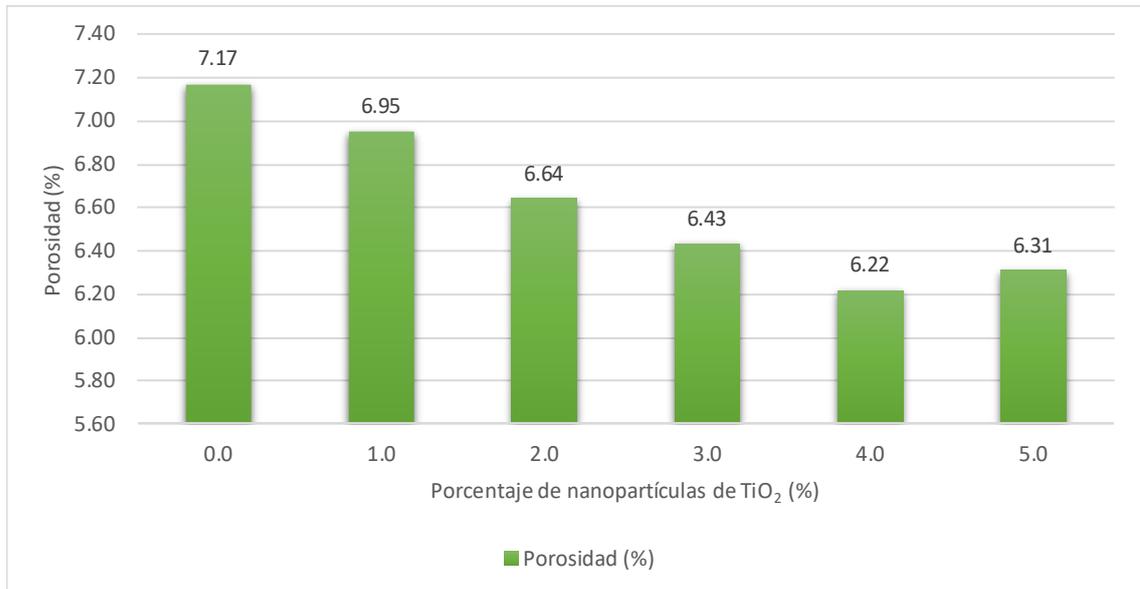
*Propiedades de los poros de la mezcla de hormigón con nano-TiO<sub>2</sub>*

Nano partículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Volumen de poros específico total (ml/g)	Diámetro de poros más probable (nm)	Porosidad (%)
0.0	0.0304	14.0	7.17
1.0	0.0266	12.0	6.95
2.0	0.0264	12.0	6.64
3.0	0.0245	11.0	6.43
4.0	0.0228	10.0	6.22
5.0	0.0239	11.0	6.31

*Nota.* Adaptado de Nazari & Riahi (2010, como se citó en Li et al., 2018)

## Figura 17

### Porosidad de los hormigones



*Nota.* Adaptado de Nazari & Riahi (2010, como se citó en Li et al., 2018)

**Artículo 19:** Características de los poros de diferentes fases en hormigón nano modificado y sus influencias en la resistencia a la compresión (Ren et al., 2022).

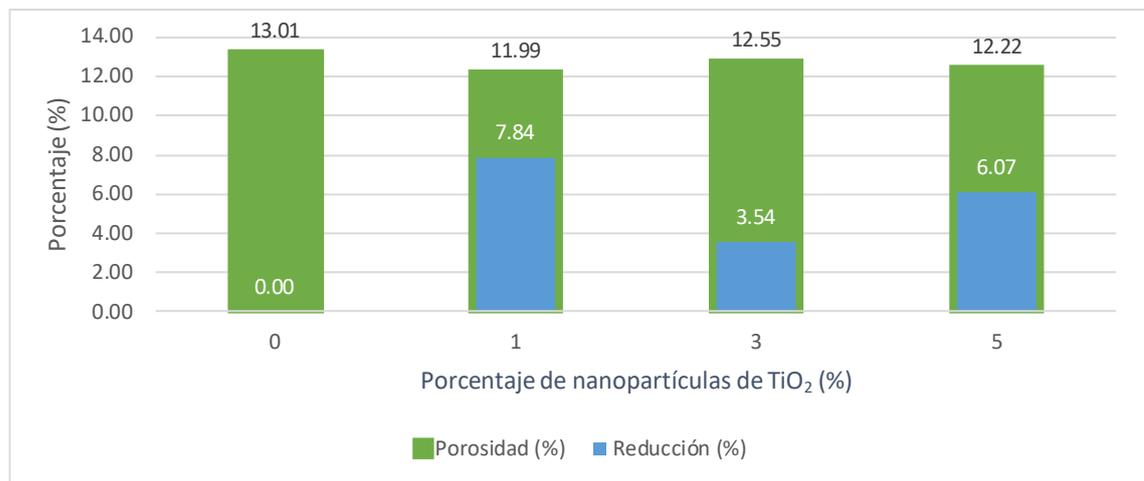
- Tipo de cemento: Cemento 42.5 Qilianshan.
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con un tamaño promedio de  $10 \pm 5$  nm, área superficial de  $150 \pm 20$  m<sup>2</sup>/g y con pureza al 99%.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.40, para el agregado fino se utilizó arena media natural con un módulo de finura de 2.37, densidad aparente de 2.61 g/cm<sup>3</sup> y contenido de humedad de 1.16%, el agregado grueso fue basalto con una densidad aparente de 2.96 g/cm<sup>3</sup> y un contenido de humedad de 0.59%, en la Tabla 12 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- Tipo de aditivos y adiciones: Se usó superplastificante de policarboxilato con reducción de agua de hasta un 25%.
- En la Tabla 13 y Figura 18 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 12***Proporción de la mezcla de hormigón con nano-TiO<sub>2</sub>*

Nanopartículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Policarboxilato (kg)	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	Fino (kg/m <sup>3</sup> )	Grueso (kg/m <sup>3</sup> )
0	450.0	4.0	180	673.0	1097.0
1	445.5	4.0	180	673.0	1097.0
3	436.5	4.0	180	673.0	1097.0
5	427.5	4.0	180	673.0	1097.0

*Nota.* Extraído de Ren et al. (2022)**Tabla 13***Proporción de la mezcla de hormigón con nano-TiO<sub>2</sub>*

Nanopartículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Porosidad (%)	Reducción (%)
0	13.01	0.00
1	11.99	7.84
3	12.55	3.54
5	12.22	6.07

*Nota.* Adaptado de Ren et al. (2022)**Figura 18***Porosidad de los hormigones**Nota.* Adaptado de Ren et al. (2022)

**5.1.2. Resultados de los porcentajes de nanopartículas de TiO<sub>2</sub> para reducir la absorción de iones de cloruro del concreto fotocatalítico**

En la Tabla 14 se muestran los artículos de reducción de absorción de iones de cloruro.

**Tabla 14**

*Artículos de reducción de absorción de iones de cloruro*

Ítem	Autor	Título	Relación a/c	Nanopartículas de TiO <sub>2</sub> (%)
2	Mao-hua Zhang, Hui Li	Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano- particles for pavement	0.42	0, 1, 3 y 5
4	Hui Li, Huigang Xiao, Xinchun Guan, Zetao Wang, Lei Yu	Chloride diffusion in concrete containing nano- TiO <sub>2</sub> under coupled effect of scouring	0.42	0 y 1
7	Garima Rawat, Sumit Gandhi, Yogesh Iyer Murthy	Durability Aspects of Concrete Containing Nano-Titanium Dioxide Effects of nano-TiO <sub>2</sub> ,	0.50	0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 y 3
18	Alireza Joshaghani, Mohammad Balapour, Mohammad Mashhadian, Togay Ozbakkaloglu	nano-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , and nano- Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> on rheology, mechanical and durability properties of self- consolidating concrete (SCC): An experimental study	0.32 y 0.40	0, 3 y 5

*Nota.* Elaboración propia

**Artículo 2:** Estructura de poros y permeabilidad a los cloruros del hormigón que contiene nanopartículas para pavimento (Zhang & Li, 2011, como se citó en Rawat et al., 2022).

- Tipo de cemento: Cemento Portland (P.O42.5).
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con pureza al 99.7% y en fase anatasa.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.42 con agregado fino de arena natural de río con un módulo de finura de 2.4, agregado grueso de diabase triturado con un diámetro de 5 a 30 mm, en la Tabla 15 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- Tipo de aditivos y adiciones: Se empleó un agente reductor de agua (UNF-5, un tipo de ácido b-naftaleno sulfónico y condensados de formaldehído) para ayudar a la dispersión de nanomateriales en la pasta de cemento y lograr una buena trabajabilidad del concreto, adicionalmente se usó un antiespumante (fosfato de tributilo) para disminuir la cantidad de burbujas de aire.
- En la Tabla 16 y Figura 19 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 15**

*Proporciones de mezcla de hormigones (kg/m<sup>3</sup>)*

Nanopartículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Agua	Cemento	Arena	Agregado Grueso	Nano-TiO <sub>2</sub>	UNF-5	Antiespumante
0	151	360	650	1260	-	5.4	-
1	151	356.4	650	1260	3.6	5.4	0.216
3	151	349.2	650	1260	10.8	7.2	0.288
5	151	342	650	1260	18	7.2	0.288

*Nota.* Extraído de Zhang & Li (2011, como se citó en Rawat et al., 2022)

**Tabla 16**

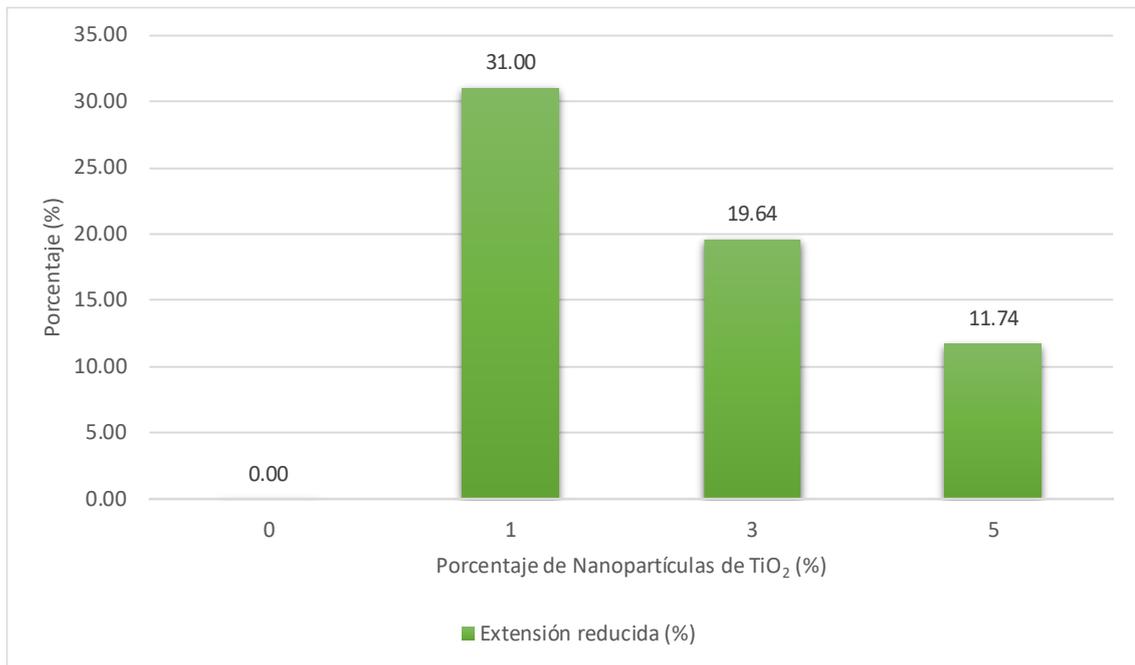
*Resultados de ensayo de permeabilidad a los cloruros de los hormigones*

Nanopartículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Coefficiente de difusión de cloruros (10 <sup>-13</sup> m <sup>2</sup> /s)	Coefficiente de variación (%)	Extensión reducida (%)
0	1.9356	5.82	0.00
1	1.3355	1.26	31.00
3	1.5554	2.21	19.64
5	1.7083	2.07	11.74

*Nota.* Extraído de Zhang & Li (2011, como se citó en Rawat et al., 2022)

**Figura 19**

*Reducción a la absorción de iones de cloruros*



*Nota.* Adaptado de Zhang & Li (2011, como se citó en Rawat et al., 2022)

**Artículo 4:** Difusión de cloruros en hormigones que contienen nano-TiO<sub>2</sub> bajo efecto acoplado de decapado (Li et al., 2014, como se citó en Rawat et al., 2022).

- Tipo de cemento: Cemento Portland (P.O32.5).
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con pureza al 99.7% y diámetro promedio de 15nm.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.42 con agregado fino de arena natural de río con un módulo de finura de 2.94, agregado grueso de diabasa triturado con radio máximo de 20mm, en la Tabla 17 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- Tipo de aditivos y adiciones: Se empleó un agente reductor de agua FDN (un tipo de ácido b-naftaleno sulfónico y condensados de aldehído de forma) y un antiespumante fosfato de tributilo para disminuir la cantidad de burbujas de aire.
- En la Tabla 18, Tabla 19, Figura 20 y Figura 21 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 17***Proporciones de mezcla de hormigones (kg/m<sup>3</sup>)*

Nano partículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Agua	Cemento	Arena	Agregado grueso	Nano- TiO <sub>2</sub>	FDN
0	190	452	535	1240	-	4.5
1	190	452	535	1240	4.5	4.5

*Nota.* Extraído de Li et al. (2014, como se citó en Rawat et al., 2022)**Tabla 18***Velocidades de erosión de PC y NC*

Tiempo de fregado (día)	Concreto convencional (PC)		Concreto con nanopartículas (NC)	
	Profundidad (mm)	Velocidad (mm/día)	Profundidad (mm)	Velocidad (mm/día)
En agua	2	0.171	0.086	0.132
	4	0.325	0.083	0.244
	6	0.506	0.083	0.355
En solución de cloruro	2	0.235	0.118	0.200
	4	0.478	0.120	0.385
	6	0.735	0.123	0.600

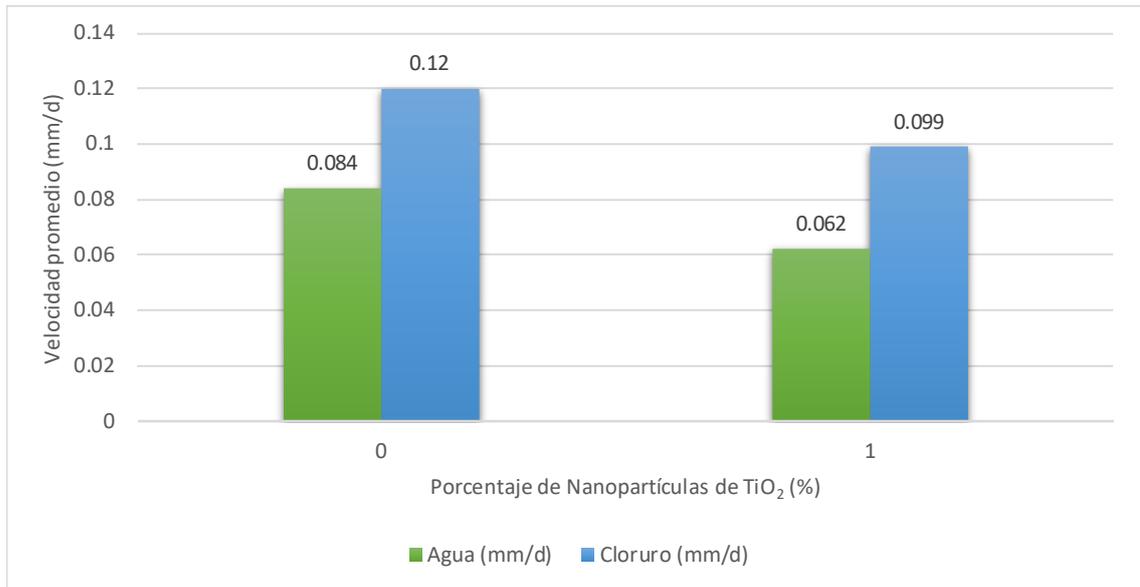
*Nota.* Extraído de Li et al. (2014, como se citó en Rawat et al., 2022)**Tabla 19***Velocidades promedio de erosión de PC y NC*

Nano partículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Agua (mm/d)	Cloruro (mm/d)	Reducción agua (%)	Reducción cloruro (%)
0	0.084	0.12	0.00	0.00
1	0.062	0.099	25.90	17.60

*Nota.* Adaptado de Li et al. (2014, como se citó en Rawat et al., 2022)

**Figura 20**

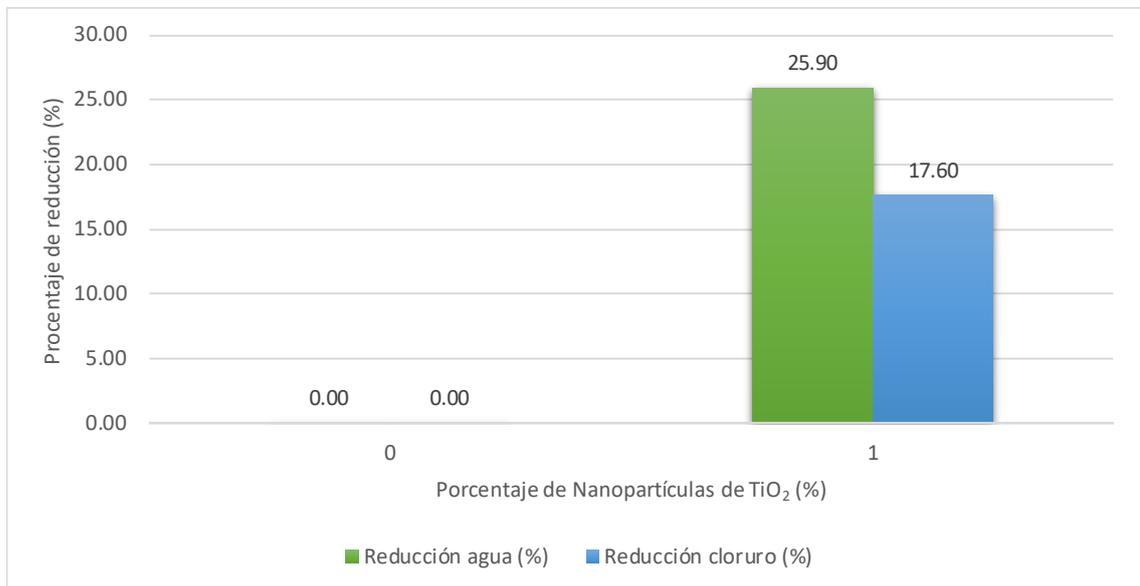
*Velocidad promedio de erosión en agua y en solución de cloruro*



*Nota.* Adaptado de Li et al. (2014, como se citó en Rawat et al., 2022)

**Figura 21**

*Porcentaje promedio de erosión en agua y en solución de cloruro*



*Nota.* Adaptado de Li et al. (2014, como se citó en Rawat et al., 2022)

**Artículo 7:** Aspectos de durabilidad del hormigón que contiene Nano-Dióxido de Titanio (Rawat et al., 2023).

- Tipo de cemento: Cemento Grado OPC 53.
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con pureza al 99.9% y en fase rutilo.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.50 con agregado fino de arena de río con un módulo de finura de 2.58, agregado grueso de basalto con un tamaño de partícula de menos de 20 mm, en la Tabla 20 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- Tipo de aditivos y adiciones: Se empleó un agente dispersante tripolifosfato de sodio (STPP) para dispersar las nanopartículas, que también funciona como una mezcla reductora de agua de alto rango (HRWRA).
- En la Tabla 21 y Figura 22 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 20**

*Proporción de mezcla de concreto agregado con nanopartículas de TiO<sub>2</sub>*

Reposición de cemento (%)	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Nano partículas de TiO <sub>2</sub>	Agua
0	385	695.57	1135.43	0	192
0.5	383.07	695.57	1135.43	1.92	192
1	381.15	695.57	1135.43	3.85	192
1.5	379.23	695.57	1135.43	5.77	192
2	377.3	695.57	1135.43	7.7	192
2.5	375.37	695.57	1135.43	9.62	192
3	373.45	695.57	1135.43	11.55	192

*Nota.* Extraído de Rawat et al. (2023)

**Tabla 21**

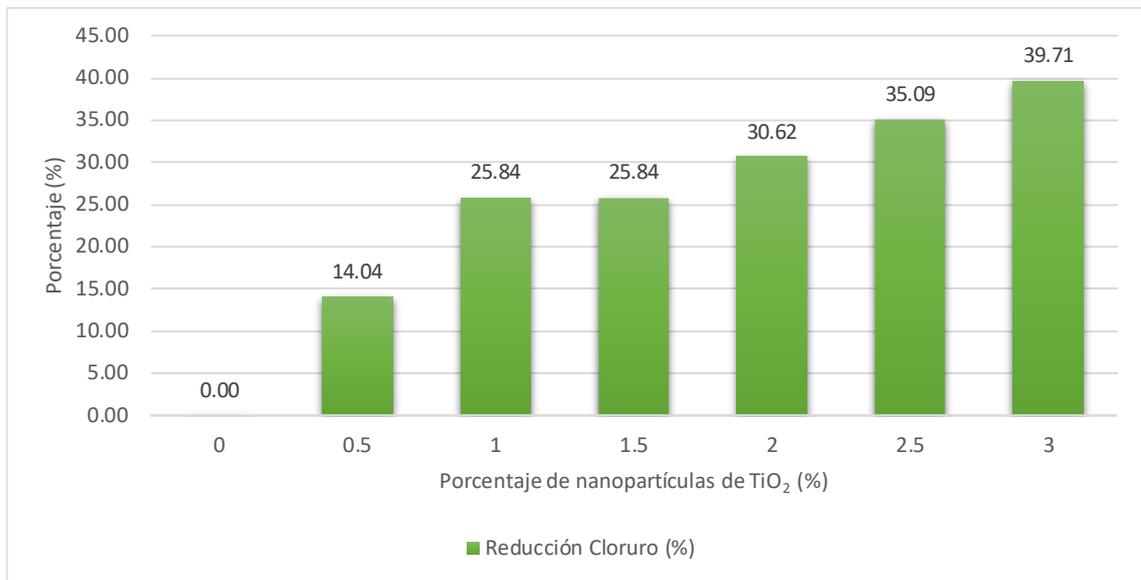
*Penetración de cloruro a la mezcla de hormigón*

Nano partículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Profundidades de muestras de concreto					Promedio penetración de cloruro (mm)	Reducción Cloruro (%)
	2.5 mm	7.5 mm	12.5 mm	17.5 mm	25 mm		
0	3.68	1.57	0.53	0.26	0.23	1.254	0.00
0.5	3.16	1.31	0.53	0.26	0.13	1.078	14.04
1	2.37	1.31	0.53	0.26	0.18	0.93	25.84
1.5	2.37	1.31	0.53	0.26	0.18	0.93	25.84
2	2.10	1.31	0.53	0.26	0.15	0.87	30.62
2.5	2.10	1.05	0.53	0.26	0.13	0.814	35.09
3	2.10	1.05	0.27	0.23	0.13	0.756	39.71

*Nota.* Adaptado de Rawat et al. (2023)

**Figura 22**

*Porcentaje promedio de reducción de absorción de iones de cloruro*



*Nota.* Adaptade de Rawat et al. (2023)

**Artículo 18:** Efectos de nano-TiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en propiedades reológicas, mecánicas y de durabilidad del hormigón autocompactante (SCC): un estudio experimental (Joshaghani et al., 2020).

- Tipo de cemento: Cemento tipo I.
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con un diámetro promedio de 18 nm y pureza al 99.9%.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.32 y 0.40 con agregado fino de sílice con un tamaño máximo de 4.75 mm, además de una absorción de agua y una gravedad específica de 2.51% y 2.67 respectivamente, el agregado grueso utilizado fue grava caliza con un tamaño máximo nominal de 12.5 mm con una abosrción de agua y gravedad específica de 1.95 y 2.82% respectivamente, en la Tabla 22 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- Tipo de aditivos y adiciones: Se empleó un aditivo reductor de agua de alto rango (HRWRA), que fue a base de éter policarboxilato con una gravedad específica de 1.09 y un aditivo modificador de la viscosidad (VMA) para mejorar la estabilidad de la mezcla y su resistencia a la segregación en las mezclas de SCC.
- En la Tabla 23, Figura 23 y Figura 24 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 22***Detalles de mezcla para hormigones con nano-TiO<sub>2</sub>*

a/c	Nanopartículas de TiO <sub>2</sub>		Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	Agregados (kg/m <sup>3</sup> )		Policarboxilato (%)	Modificador de la viscosidad (%)
	%	(kg/m <sup>3</sup> )			Grueso	Fino		
		0	0	425	136	719	1067	0.14
0.32	3	12.75	412.3	136	718	1065	0.26	0
	5	21.25	403.7	136	718	1063	0.36	0
0.40	0	0	375	150	721	1071	0.15	2.89
	3	11.25	363.7	150	719	1068	0.25	0
	5	18.75	356.2	150	719	1067	0.36	0

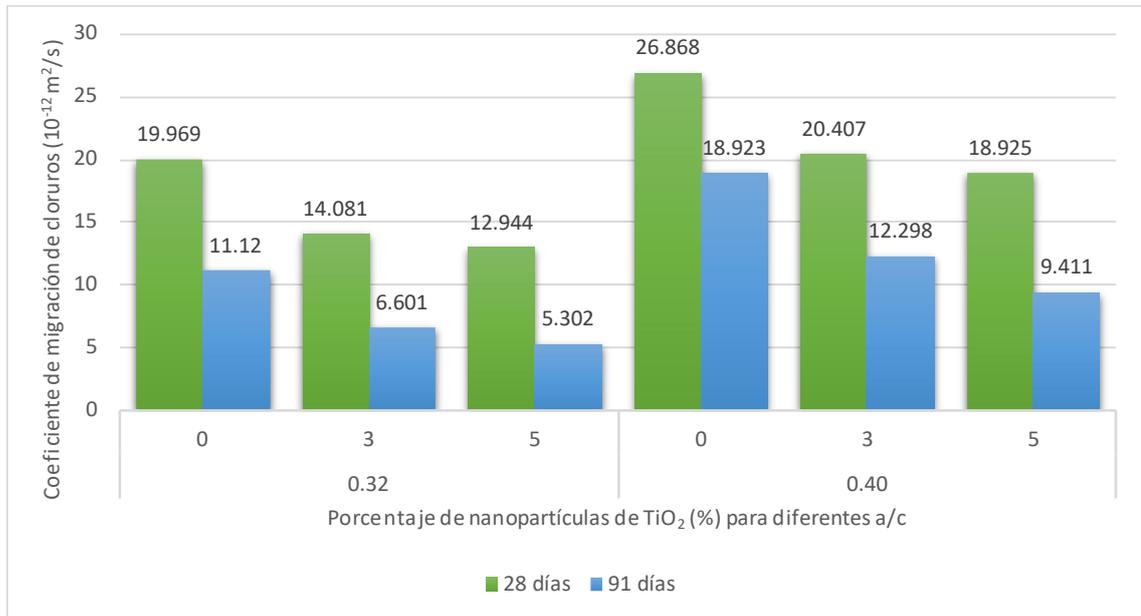
*Nota.* Extraído de Joshaghani et al. (2020)**Tabla 23***Coefficiente de migración de cloruros para mezclas de concreto*

a/c	Nanopartículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Coeficiente de migración de cloruros (10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s)		Reducción (%)	
		28 días	91 días	28 días	91 días
0.32	3	14.081	6.601	29.49	40.64
	5	12.944	5.302	35.18	52.32
0.40	0	26.868	18.923	0.00	0.00
	3	20.407	12.298	24.05	35.01
	5	18.925	9.411	29.56	50.27

*Nota.* Adaptado de Joshaghani et al. (2020)

**Figura 23**

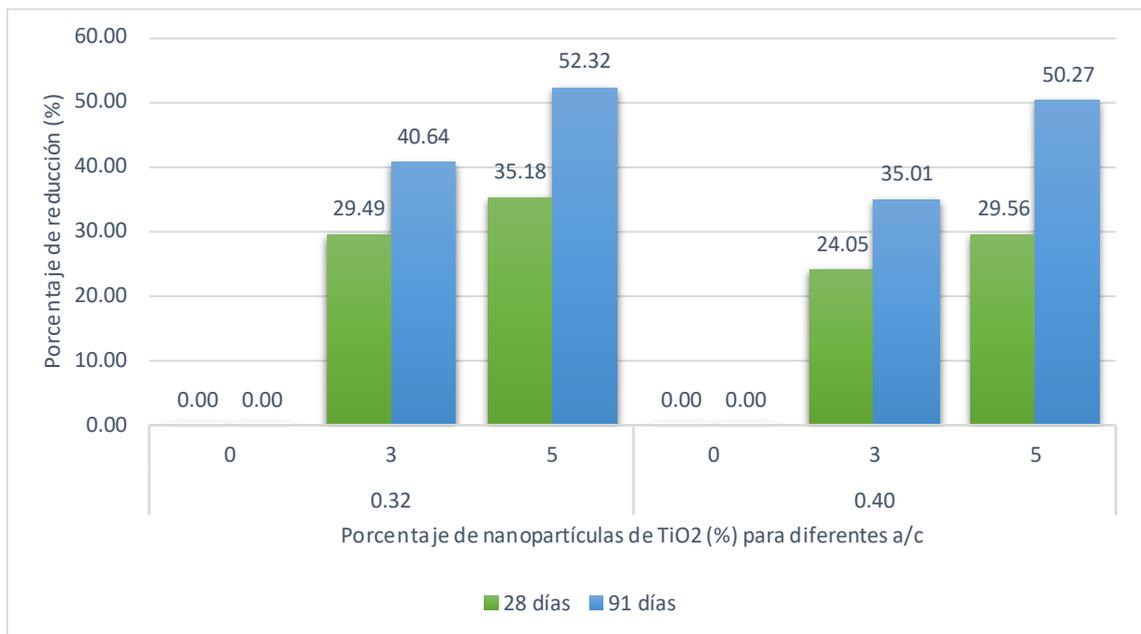
*Coefficiente de migración de cloruros*



*Nota.* Adaptado de Joshaghani et al. (2020)

**Figura 24**

*Porcentaje de reducción de absorción de iones de cloruro*



*Nota.* Adaptado de Joshaghani et al. (2020)

**5.1.3. Resultados de los porcentajes de nanopartículas de TiO<sub>2</sub> para incrementar la resistencia a la compresión del concreto fotocatalítico**

En la Tabla 24 se muestran los artículos de incremento de la resistencia a la compresión.

**Tabla 24**

*Artículos de resistencia a la compresión*

Ítem	Autor	Título	Relación a/c	Nanopartículas de TiO <sub>2</sub> (%)
2	Mao-hua Zhang, Hui Li	Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement	0.42	0, 1, 3 y 5
3	Ali Nazari, Shadi Riahi, Shirin Riahi, Seyedeh Fatemeh Shamekhi and A. Khademno	Assessment of the effects of the cement paste composite in presence TiO <sub>2</sub> nanoparticles	0.40	0, 0.5, 1, 1.5 y 2
4	Hui Li, Huigang Xiao, Xinchun Guan, Zetao Wang, Lei Yu	Chloride diffusion in concrete containing nano-TiO <sub>2</sub> under coupled effect of scouring	0.42	0 y 1
7	Garima Rawat, Sumit Gandhi, and Yogesh Iyer Murthy	Durability Aspects of Concrete Containing Nano-Titanium Dioxide	0.50	0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 y 3
10	Ali Nazari, Shadi Riahi	The effect of TiO <sub>2</sub> nanoparticles on water permeability and thermal and mechanical properties of high strength self-compacting concrete	0.40	0, 1, 2, 3, 4 y 5
12	Sumit Sharma, Inderpreet Kaur, Sushant Gupta	Effect of Fly Ash and Nano Titanium Dioxide on Compressive Strength of Concrete	0.50	0, 1, 1.5 y 2
13	Caroline S. Sobhy, Taher A. Tawfik, G.M. Abd El Hafez, A. Serag Faried	Insights on the influence of nano-Titanium dioxide and nano-Zinc oxide on mechanical properties and inhibiting of steel reinforcement	0.45	0, 0.5, 1 y 1.5
15	Dr.R.Umamaheswari, S.Monisha	Experimental investigation of concrete using titanium dioxide	0.43	0, 0.5, 1, 1.5 y 2

*Nota.* Elaboración propia

**Artículo 2:** Estructura de poros y permeabilidad a los cloruros del hormigón que contiene nanopartículas para pavimento (Zhang & Li, 2011, como se citó en Rawat et al., 2022).

- Tipo de cemento: Cemento Portland (P.O42.5).
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con pureza al 99.7% y en fase anatasa.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.42 con agregado fino de arena natural de río con un módulo de finura de 2.4, agregado grueso de diabase triturado con un diámetro de 5 a 30 mm, en la Tabla 25 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- Tipo de aditivos y adiciones: Se empleó un agente reductor de agua (UNF-5, un tipo de ácido b-naftaleno sulfónico y condensados de formaldehído) para ayudar a la dispersión de nanomateriales en la pasta de cemento y lograr una buena trabajabilidad del concreto, adicionalmente se usó un antiespumante (fosfato de tributilo) para disminuir la cantidad de burbujas de aire.
- En la Tabla 26 y Figura 25 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 25**

*Proporciones de mezcla de hormigones (kg/m<sup>3</sup>)*

Nanopartículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Agua	Cemento	Arena	Agregado Grueso	Nano-TiO <sub>2</sub>	UNF-5	Antiespumante
0	151	360	650	1260	-	5.4	-
1	151	356.4	650	1260	3.6	5.4	0.216
3	151	349.2	650	1260	10.8	7.2	0.288
5	151	342	650	1260	18	7.2	0.288

*Nota.* Extraído de Zhang & Li (2011, como se citó en Rawat et al., 2022)

**Tabla 26**

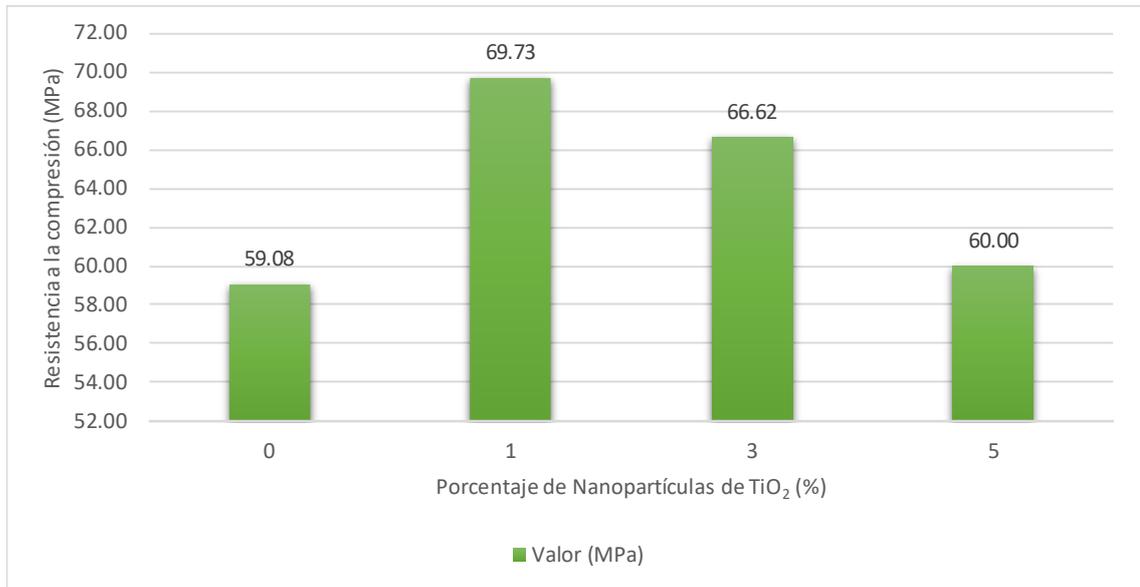
*Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)*

Nanopartículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Fuerza compresión		
	Valor (MPa)	Coefficiente de variación (%)	Extensión mejorada (%)
0	59.08	3.16	0.00
1	69.73	5.47	18.03
3	66.62	6.12	12.76
5	60.00	4.93	1.55

*Nota.* Extraído de Zhang & Li (2011, como se citó en Rawat et al., 2022)

**Figura 25**

*Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)*



*Nota.* Adaptado de Zhang & Li (2011, como se citó en Rawat et al., 2022)

**Artículo 3:** Evaluación de los efectos del compuesto de pasta de cemento en presencia de nanopartículas de TiO<sub>2</sub> (Nazari et al., 2010, como se citó en Rawat et al., 2022).

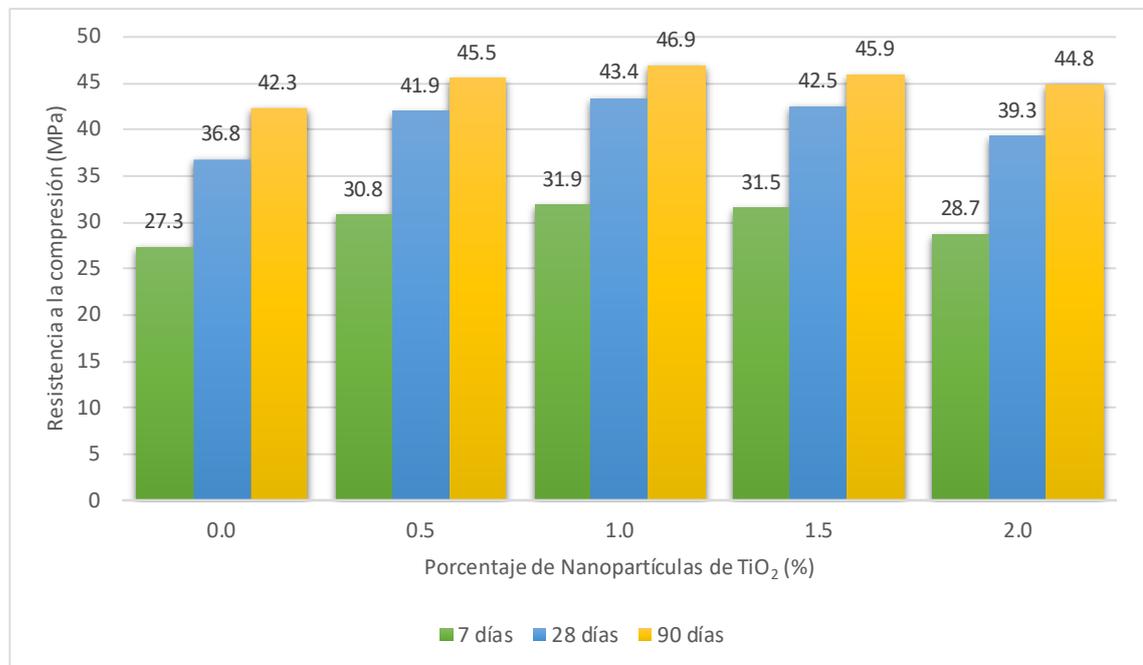
- Tipo de cemento: Cemento Portland ordinario (OPC) conforme a la norma ASTM C150.
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con diámetro de 15 nm y una pureza al 99.9%.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.40 con agregado fino de arena natural con partículas menores de 0.5mm, módulo de finura de 2.25 y gravedad específica de 2.58 g/cm<sup>3</sup>, agregado grueso de basalto triturado con tamaño máximo de 15mm y una gravedad específica de 2.96 g/cm<sup>3</sup>, en la Tabla 27 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- En la Tabla 28 y Figura 26 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 27***Proporción de la mezcla de hormigones adicionados con TiO<sub>2</sub>*

Nano partículas de TiO <sub>2</sub>	Cantidades (kg/m <sup>3</sup> )	
	Cemento	Nano partículas de TiO <sub>2</sub>
0.0	550.00	0.00
0.5	547.25	2.75
1.0	544.50	5.50
1.5	541.75	8.25
2.0	539.00	11.00

*Nota.* Extraído de Nazari et al. (2010, como se citó en Rawat et al., 2022)**Tabla 28***Resistencia a la compresión a los 7, 28 y 90 días (MPa)*

Nano partículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Resistencia a la compresión (MPa)		
	7 días	28 días	90 días
0.0	27.3	36.8	42.3
0.5	30.8	41.9	45.5
1.0	31.9	43.4	46.9
1.5	31.5	42.5	45.9
2.0	28.7	39.3	44.8

*Nota.* Extraído de Nazari et al. (2010, como se citó en Rawat et al., 2022)**Figura 26***Resistencia a la compresión a los 7, 28 y 90 días (MPa)**Nota.* Adaptado de Nazari et al. (2010, como se citó en Rawat et al., 2022)

**Artículo 4:** Difusión de cloruros en hormigones que contienen nano-TiO<sub>2</sub> bajo efecto acoplado de decapado (Li et al., 2014, como se citó en Rawat et al., 2022).

- Tipo de cemento: Cemento Portland (P.O32.5).
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con pureza al 99.7% y diámetro promedio de 15nm.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.42 con agregado fino de arena natural de río con un módulo de finura de 2.94, agregado grueso de diabasa triturado con radio máximo de 20mm, en la Tabla 29 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- Tipo de aditivos y adiciones: Se empleó un agente reductor de agua FDN (un tipo de ácido b-naftaleno sulfónico y condensados de aldehído de forma) y un antiespumante fosfato de tributilo para disminuir la cantidad de burbujas de aire.
- En la Tabla 30 y Figura 27 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 29**

*Proporciones de mezcla de hormigones (kg/m<sup>3</sup>)*

Nano partículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Agua	Cemento	Arena	Agregado grueso	Nano- TiO <sub>2</sub>	FDN
0	190	452	535	1240	-	4.5
1	190	452	535	1240	4.5	4.5

*Nota.* Extraído de Li et al. (2014, como se citó en Rawat et al., 2022)

**Tabla 30**

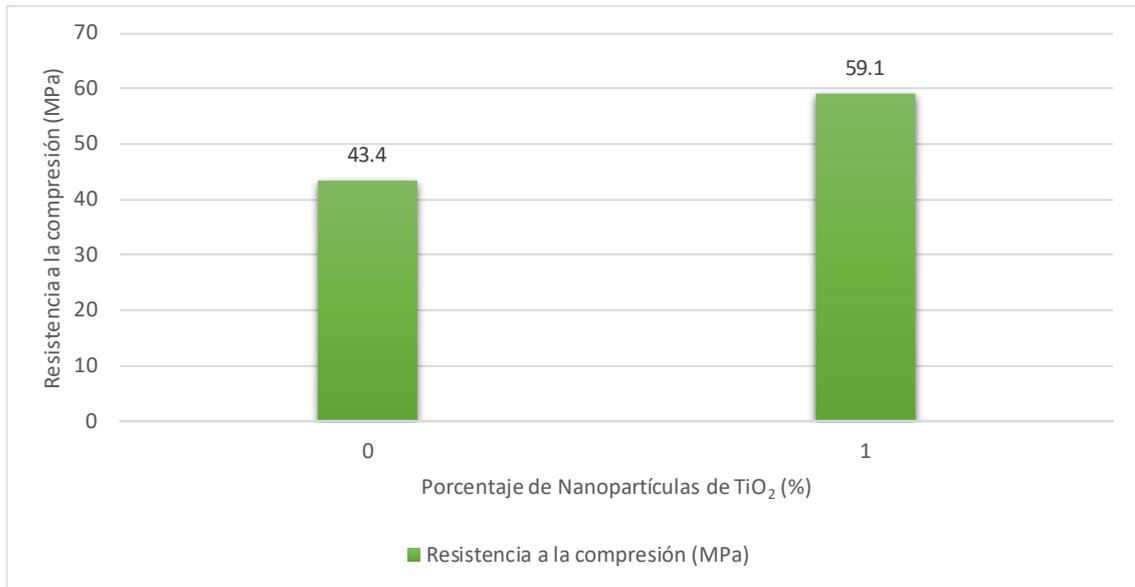
*Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)*

Nano partículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Resistencia a la compresión (MPa)
0	43.4
1	59.1

*Nota.* Extraído de Li et al. (2014, como se citó en Rawat et al., 2022)

**Figura 27**

*Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)*



*Nota.* Adaptado de Li et al. (2014, como se citó en Rawat et al., 2022)

**Artículo 7:** Aspectos de durabilidad del hormigón que contiene Nano-Dióxido de Titanio (Rawat et al., 2023).

- Tipo de cemento: Cemento Grado OPC 53.
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con pureza al 99.9% y en fase rutilo.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.50 con agregado fino de arena de río con un módulo de finura de 2.58, agregado grueso de basalto con un tamaño de partícula de menos de 20 mm, en la Tabla 31 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- Tipo de aditivos y adiciones: Se empleó un agente dispersante tripolifosfato de sodio (STPP) para dispersar las nanopartículas, que también funciona como una mezcla reductora de agua de alto rango (HRWRA).
- En la Tabla 32 y Figura 28 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 31***Proporción de mezcla de concreto agregado con nanopartículas de TiO<sub>2</sub>*

Reposición de cemento (%)	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Nano partículas de TiO <sub>2</sub>	Agua
0	385	695.57	1135.43	0	192
0.5	383.07	695.57	1135.43	1.92	192
1	381.15	695.57	1135.43	3.85	192
1.5	379.23	695.57	1135.43	5.77	192
2	377.3	695.57	1135.43	7.7	192
2.5	375.37	695.57	1135.43	9.62	192
3	373.45	695.57	1135.43	11.55	192

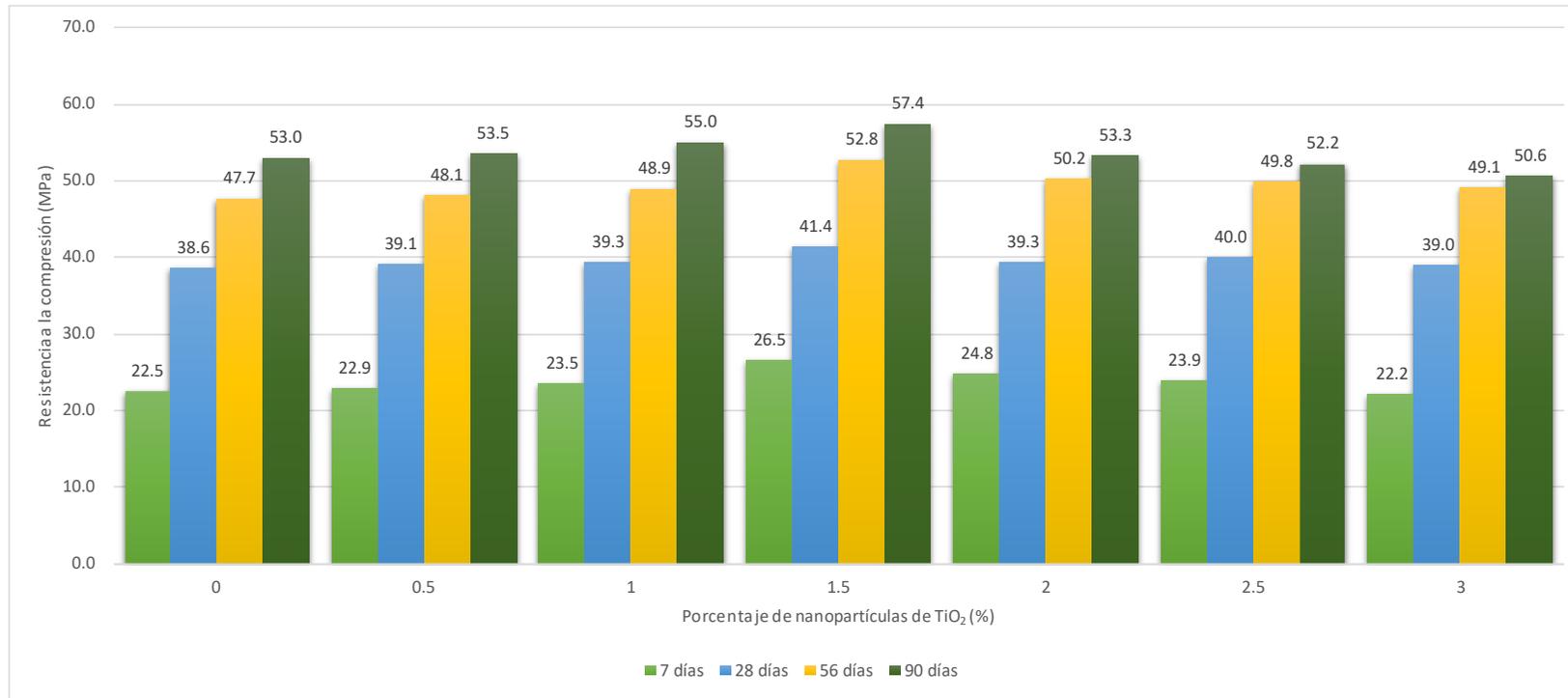
*Nota.* Extraído de Rawat et al. (2023)**Tabla 32***Resistencia a la compresión a los 7, 28, 56 y 90 días (MPa)*

Nano partículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Resistencia a la compresión (MPa)			
	7 días	28 días	56 días	90 días
0	22.5	38.6	47.7	53.0
0.5	22.9	39.1	48.1	53.5
1	23.5	39.3	48.9	55.0
1.5	26.5	41.4	52.8	57.4
2	24.8	39.3	50.2	53.3
2.5	23.9	40.0	49.8	52.2
3	22.2	39.0	49.1	50.6

*Nota.* Extraído de Fuente: Rawat et al. (2023)

**Figura 28**

*Resistencia a la compresión a los 7, 28, 56 y 90 días (MPa)*



*Nota.* Adaptado de Rawat et al. (2023)

**Artículo 10:** El efecto de las nanopartículas de TiO<sub>2</sub> sobre la permeabilidad al agua y las propiedades térmicas y mecánicas del hormigón autocompactante de alta resistencia (Nazari & Riahi, 2010, como se citó en Li et al., 2018).

- Tipo de cemento: Cemento Portland ordinario (OPC) según la norma ASTM C150.
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con un tamaño promedio de 15nm, 45m<sup>2</sup>/g de finura y con pureza al 99.9%.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.40, se utilizaron áridos calizos triturados para producir hormigones autocompactantes, con grava 4/12 y dos tipos de arena: una gruesa 0/4, para áridos finos y otra 0/2, con un contenido alto de muy finos (tamaño de partícula < 0.063 mm) de 19.2% cuya función era aportar un mayor volumen de materiales finos para mejorar la estabilidad del hormigón fresco, en la Tabla 33 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- Tipo de aditivos y adiciones: Se empleó un policarboxilato con un aditivo a base de antiespumante de condensado de polietileno (1% en peso de mezcla).
- En la Tabla 34 y Figura 29 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 33**

*Proporción de la mezcla de hormigón con nano-TiO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>)*

Nano partículas de TiO <sub>2</sub>	Contenido de PC (%)	Cantidades (kg/m <sup>3</sup> )	
		Cemento	Nano partículas de TiO <sub>2</sub>
0.0	1.0	450.00	0.00
1.0	1.0	445.50	4.50
2.0	1.0	441.00	9.00
3.0	1.0	437.50	13.50
4.0	1.0	432.00	18.00
5.0	1.0	427.50	22.50

*Nota.* Extraído de Nazari & Riahi (2010, como se citó en Li et al., 2018)

**Tabla 34**

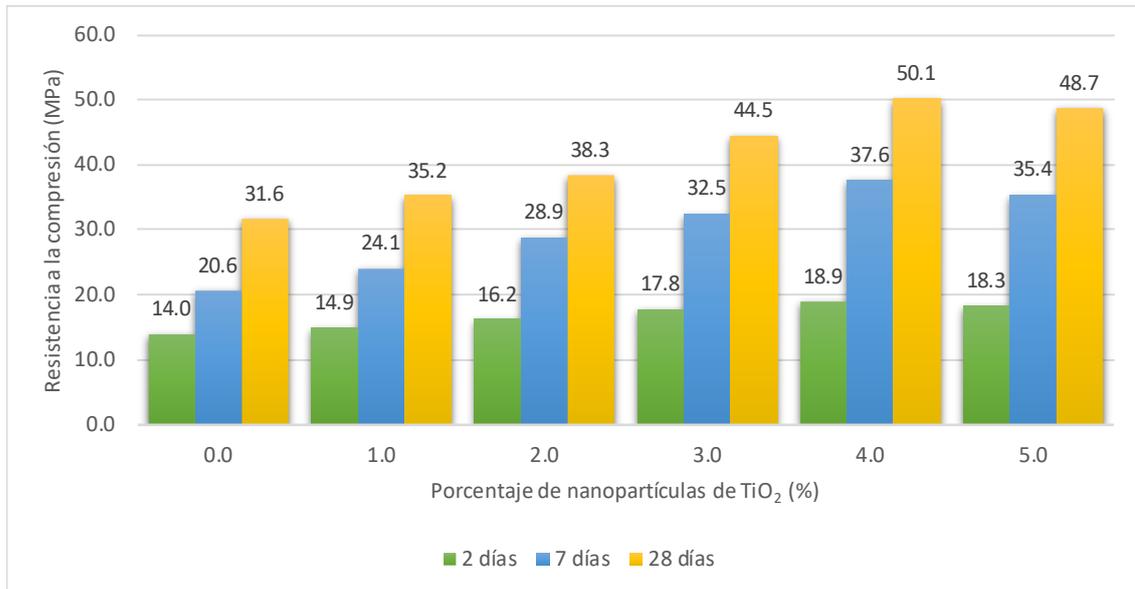
*Resistencia a la compresión a los 2, 7 y 28 días (MPa)*

Nano partículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Resistencia a la compresión (MPa)		
	2 días	7 días	28 días
0.0	14.0	20.6	31.6
1.0	14.9	24.1	35.2
2.0	16.2	28.9	38.3
3.0	17.8	32.5	44.5
4.0	18.9	37.6	50.1
5.0	18.3	35.4	48.7

*Nota.* Extraído de Nazari & Riahi (2010, como se citó en Li et al., 2018)

**Figura 29**

*Resistencia a la compresión a los 2, 7 y 28 días (MPa)*



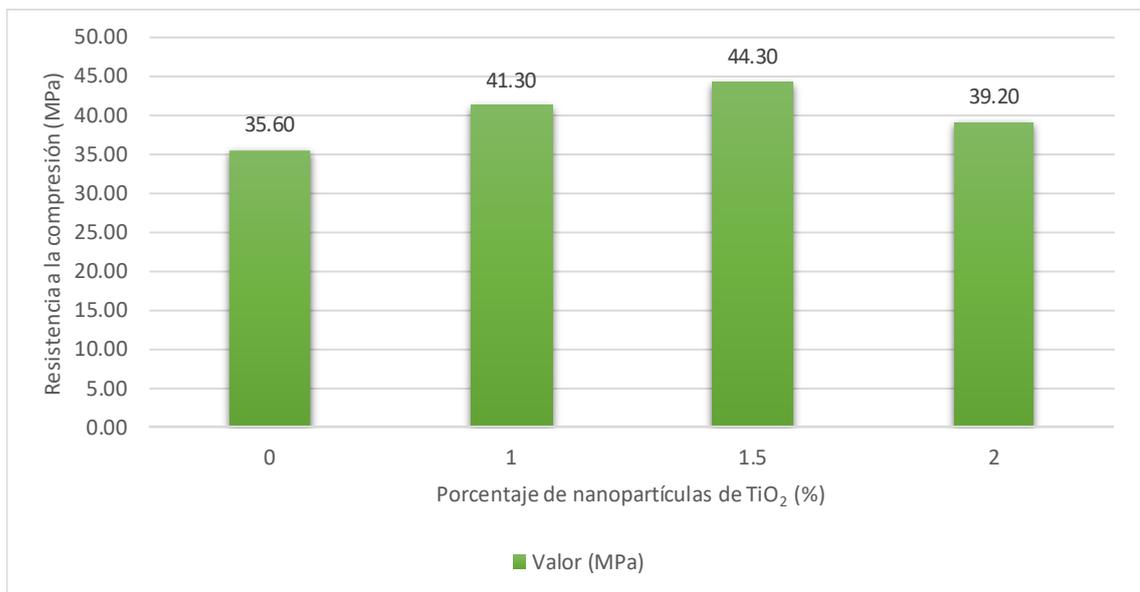
*Nota.* Adaptado de Nazari & Riahi (2010, como se citó en Li et al., 2018)

**Artículo 12:** Efecto de las cenizas volantes y el dióxido de nano titanio en la compresión Resistencia del hormigón (Sharma et al., 2019).

- Tipo de cemento: Cemento Portland grado OPC 43.
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con un tamaño promedio de 15nm y con pureza al 99.9%.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.50, agregado fino de piedra natural triturada con un módulo de finura de 2.85 y gravedad específica de 2.64, el agregado grueso se obtuvo triturando piedra natural de 20 mm de tamaño y con módulo de finura de 2.65.
- Tipo de aditivos y adiciones: Se empleó cenizas volantes de clase F con diferentes porcentajes cuando se reemplaza en peso (10%, 20% y 30%) siendo dichos resultados no tomados en cuenta para nuestra investigación.
- En la Tabla 35 y Figura 30 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 35***Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)*

Nanopartículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Fuerza compresión	
	Valor (MPa)	Extensión mejorada (%)
0	35.60	0.00
1	41.30	16.01
1.5	44.30	24.44
2	39.20	10.11

*Nota.* Adaptado de Sharma et al. (2019)**Figura 30***Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)**Nota.* Adaptado de Sharma et al. (2019)

**Artículo 13:** Información sobre la influencia del nano dióxido de titanio y el nano óxido de zinc en las propiedades mecánicas y la inhibición del refuerzo de acero (Sobhy et al., 2022).

- Tipo de cemento: Cemento Portland ordinario (OPC) grado 42.5 conforme a la norma ASTM C150.
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con un tamaño promedio de 25nm y con pureza al 99%.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.45, el agregado fino fue arena natural con un tamaño máximo nominal (NMS) de 4.75 mm, y el agregado grueso (CA) en este trabajo fue dolomita triturada con un tamaño máximo nominal de 10 mm. Las pruebas de agregado se realizaron de acuerdo con las normas ASTM C128 y ASTM C127, en la Tabla 36 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- En la Tabla 37 y Figura 31 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 36**

*Composición de las mezclas de hormigón con nano-TiO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>)*

TiO <sub>2</sub> (%)	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Dolomita (kg/m <sup>3</sup> )	Arena (kg/m <sup>3</sup> )	Agua (kg/m <sup>3</sup> )
0	400	1248	625	180
0.5	400	1248	625	180
1	400	1248	625	180
1.5	400	1248	625	180

*Nota.* Extraído de Sobhy et al. (2022)

**Tabla 37**

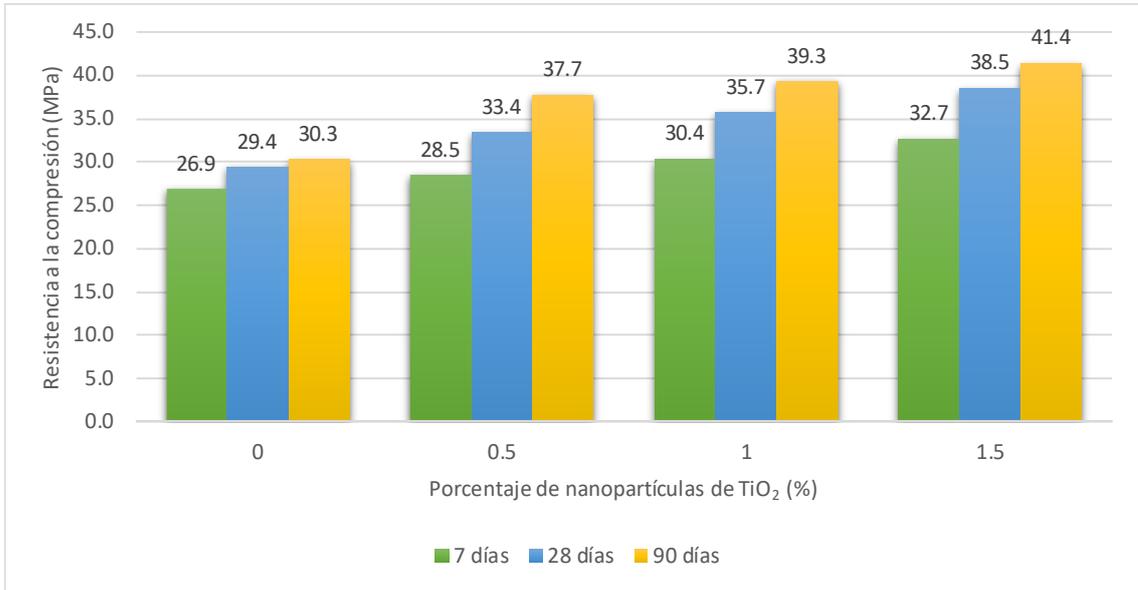
*Resistencia a la compresión a los 7, 28 y 90 días (MPa)*

TiO <sub>2</sub> (%)	Resistencia a la compresión (MPa)		
	7 días	28 días	90 días
0	26.9	29.4	30.3
0.5	28.5	33.4	37.7
1	30.4	35.7	39.3
1.5	32.7	38.5	41.4

*Nota.* Adaptado de Sobhy et al. (2022)

**Figura 31**

*Resistencia a la compresión a los 7, 28 y 90 días (MPa)*



*Nota.* Adaptado de Sobhy et al. (2022)

**Artículo 15:** Investigación experimental del hormigón con dióxido de titanio (Umamaheswari & Monisha, 2019).

- Tipo de cemento: Cemento Portland ordinario (OPC) grado 53.
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con gravedad específica de 4.26 y densidad de 3.82 g/cm<sup>3</sup>.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.43, el agregado fino fue arena natural de río con una gravedad específica de 2.60 y el agregado grueso fue piedra triturada con una gravedad específica de 2.75, en la Tabla 38 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- En la Tabla 39 y Figura 32 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 38**

*Composición de las mezclas de hormigón con nano-TiO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>)*

Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado fino (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado grueso (kg/m <sup>3</sup> )	Agua (kg/m <sup>3</sup> )
400	655.11	1133	172.68
1	1.56	2.9	0.43

*Nota.* Extraído de Umamaheswari & Monisha (2019)

**Tabla 39**

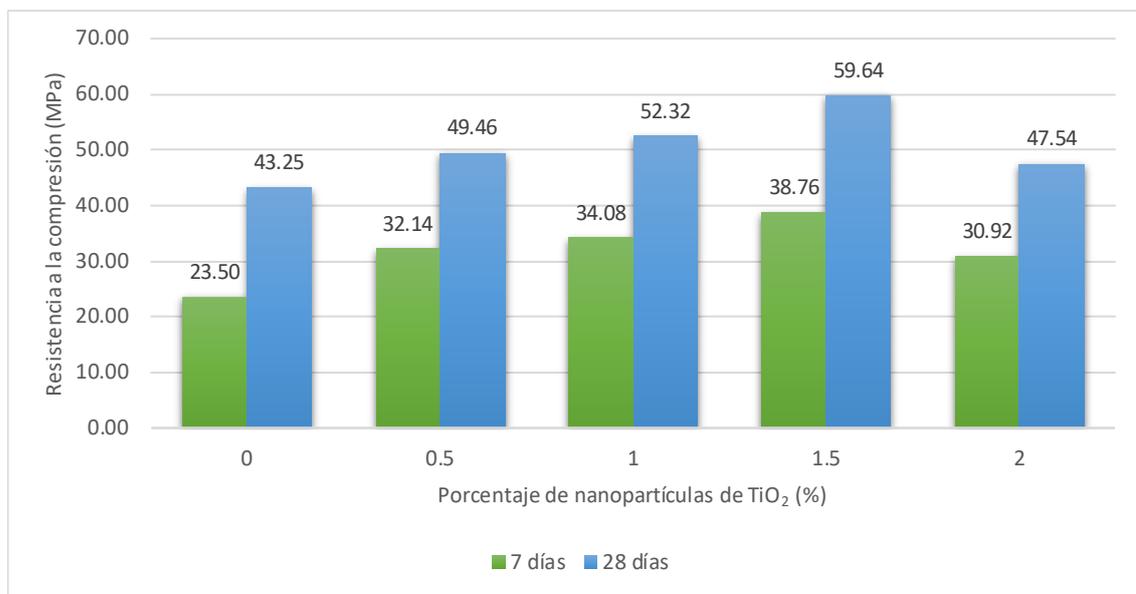
*Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días (MPa)*

TiO <sub>2</sub> (%)	Resistencia a la compresión (MPa)	
	7 días	28 días
0	23.50	43.25
0.5	32.14	49.46
1	34.08	52.32
1.5	38.76	59.64
2	30.92	47.54

*Nota.* Extraído de Umamaheswari & Monisha (2019)

**Figura 32**

*Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días (MPa)*



*Nota.* Adaptado de Umamaheswari & Monisha (2019)

**5.1.4. Resultados de los porcentajes de nanopartículas de  $TiO_2$  para incrementar la resistencia a la flexión del concreto fotocatalítico**

En la Tabla 40 se muestran los artículos de incremento de la resistencia a la flexión.

**Tabla 40**

*Artículos de resistencia a la flexión*

Ítem	Autor	Título	Relación a/c	Nanopartículas de $TiO_2$ (%)
2	Mao-hua Zhang, Hui Li	Pore structure and chloride permeability of concrete containing nanoparticles for pavement	0.42	0, 1, 3 y 5
6	Ali Nazari, Shadi Riahi, Shirin Riahi, Seyedeh Fatemeh Shamekhi and A. Khademno	Improvement the mechanical properties of the cementitious composite by using $TiO_2$ nanoparticles	0.40	0, 0.5, 1, 1.5 y 2
7	Garima Rawat, Sumit Gandhi, and Yogesh Iyer Murthy	Durability Aspects of Concrete Containing Nano-Titanium Dioxide	0.50	0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 y 3
10	Ali Nazari, Shadi Riahi	The effect of $TiO_2$ nanoparticles on water permeability and thermal and mechanical properties of high strength self-compacting concrete	0.40	0, 1, 2, 3, 4 y 5
13	Caroline S. Sobhy, Taher A. Tawfik, G.M. Abd El Hafez, A. Serag Faried	Insights on the influence of nano-Titanium dioxide and nano-Zinc oxide on mechanical properties and inhibiting of steel reinforcement	0.45	0, 0.5, 1 y 1.5
15	Dr.R.Umamaheswari, S.Monisha	Experimental investigation of concrete using titanium dioxide	0.43	0 y 1.5

*Nota.* Elaboración propia

**Artículo 2:** Estructura de poros y permeabilidad a los cloruros del hormigón que contiene nanopartículas para pavimento (Zhang & Li, 2011, como se citó en Rawat et al., 2022).

- Tipo de cemento: Cemento Portland (P.O42.5).
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con pureza al 99.7% y en fase anatasa.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.42 con agregado fino de arena natural de río con un módulo de finura de 2.4, agregado grueso de diabase triturado con un diámetro de 5 a 30 mm, en la Tabla 41 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- Tipo de aditivos y adiciones: Se empleó un agente reductor de agua (UNF-5, un tipo de ácido b-naftaleno sulfónico y condensados de formaldehído) para ayudar a la dispersión de nanomateriales en la pasta de cemento y lograr una buena trabajabilidad del concreto, adicionalmente se usó un antiespumante (fosfato de tributilo) para disminuir la cantidad de burbujas de aire.
- En la Tabla 42 y Figura 33 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 41**

*Proporciones de mezcla de hormigones (kg/m<sup>3</sup>)*

Nanopartículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Agua	Cemento	Arena	Agregado Grueso	Nano-TiO <sub>2</sub>	UNF-5	Antiespumante
0	151	360	650	1260	-	5.4	-
1	151	356.4	650	1260	3.6	5.4	0.216
3	151	349.2	650	1260	10.8	7.2	0.288
5	151	342	650	1260	18	7.2	0.288

*Nota.* Extraído de Zhang & Li (2011, como se citó en Rawat et al., 2022)

**Tabla 42**

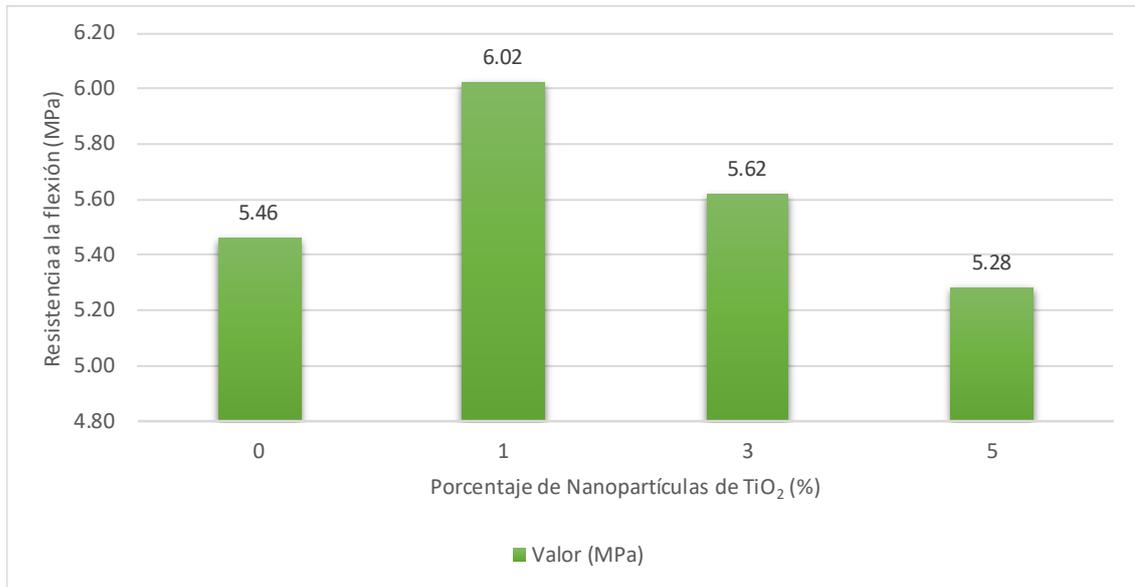
*Resistencia a la flexión a los 28 días (MPa)*

Nanopartículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Valor (MPa)	Fuerza Flexión	
		Coefficiente de variación (%)	Extensión mejorada (%)
0	5.46	6.29	0.00
1	6.02	4.20	10.28
3	5.62	4.28	3.04
5	5.28	6.00	-3.27

*Nota.* Extraído de Zhang & Li (2011, como se citó en Rawat et al., 2022)

**Figura 33**

*Resistencia a la flexión a los 28 días (MPa)*



*Nota.* Adaptado de Zhang & Li (2011, como se citó en Rawat et al., 2022)

**Artículo 6:** Mejora de las propiedades mecánicas del compuesto cementoso mediante el uso de nanopartículas de TiO<sub>2</sub> (Nazari et al., 2010, como se citó en Rawat et al., 2022).

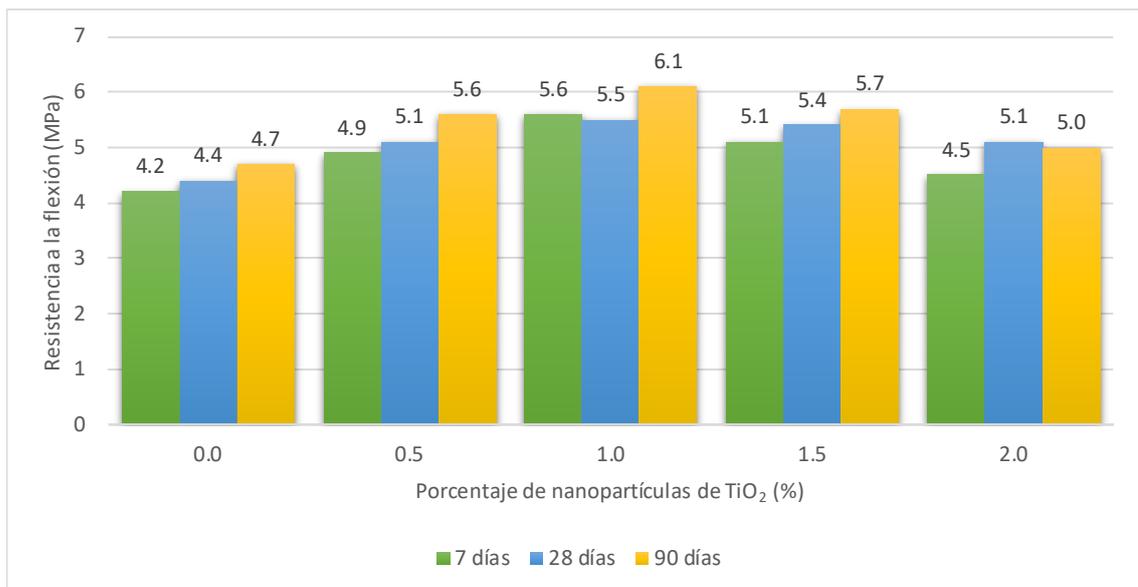
- Tipo de cemento: Cemento Portland ordinario (OPC) conforme a la norma ASTM C150.
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con diámetro de 15nm y una pureza al 99.9%.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.40 con agregado fino de arena natural con partículas menores de 0.5mm, módulo de finura de 2.25 y gravedad específica de 2.58 g/cm<sup>3</sup>, agregado grueso de basalto triturado con tamaño máximo de 15mm y una gravedad específica de 2.96 g/cm<sup>3</sup>, en la Tabla 43 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- En la Tabla 44 y Figura 34 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 43***Proporción de la mezcla de hormigones adicionados con TiO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>)*

Nano partículas de TiO <sub>2</sub>	Cantidades (kg/m <sup>3</sup> )	
	Cemento	Nano partículas de TiO <sub>2</sub>
0.0	550.00	0.00
0.5	547.25	2.75
1.0	544.50	5.50
1.5	541.75	8.25
2.0	539.00	11.00

*Nota.* Extraído de Nazari et al. (2010, como se citó en Rawat et al., 2022)**Tabla 44***Resistencia a la flexión a los 7, 28 y 90 días (MPa)*

Nano partículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Resistencia a la flexión (MPa)		
	7 días	28 días	90 días
0.0	4.2	4.4	4.7
0.5	4.9	5.1	5.6
1.0	5.6	5.5	6.1
1.5	5.1	5.4	5.7
2.0	4.5	5.1	5.0

*Nota.* Extraído de Nazari et al. (2010, como se citó en Rawat et al., 2022)**Figura 34***Resistencia a la flexión a los 7, 28 y 90 días (MPa)**Nota.* Adaptado de Nazari et al. (2010, como se citó en Rawat et al., 2022)

**Artículo 7:** Aspectos de durabilidad del hormigón que contiene Nano-Dióxido de Titanio (Rawat et al., 2023).

- Tipo de cemento: Cemento Grado OPC 53.
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con pureza al 99.9% y en fase rutilo.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.50 con agregado fino de arena de río con un módulo de finura de 2.58, agregado grueso de basalto con un tamaño de partícula de menos de 20 mm, en la Tabla 45 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- Tipo de aditivos y adiciones: Se empleó un agente dispersante tripolifosfato de sodio (STPP) para dispersar las nanopartículas, que también funciona como una mezcla reductora de agua de alto rango (HRWRA).
- En la Tabla 46 y Figura 35 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 45**

*Proporción de mezcla de concreto agregado con nano-TiO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>)*

Reposición de cemento (%)	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Nano partículas de TiO <sub>2</sub>	Agua
0	385	695.57	1135.43	0	192
0.5	383.07	695.57	1135.43	1.92	192
1	381.15	695.57	1135.43	3.85	192
1.5	379.23	695.57	1135.43	5.77	192
2	377.3	695.57	1135.43	7.7	192
2.5	375.37	695.57	1135.43	9.62	192
3	373.45	695.57	1135.43	11.55	192

*Nota.* Extraído de Rawat et al. (2023)

**Tabla 46**

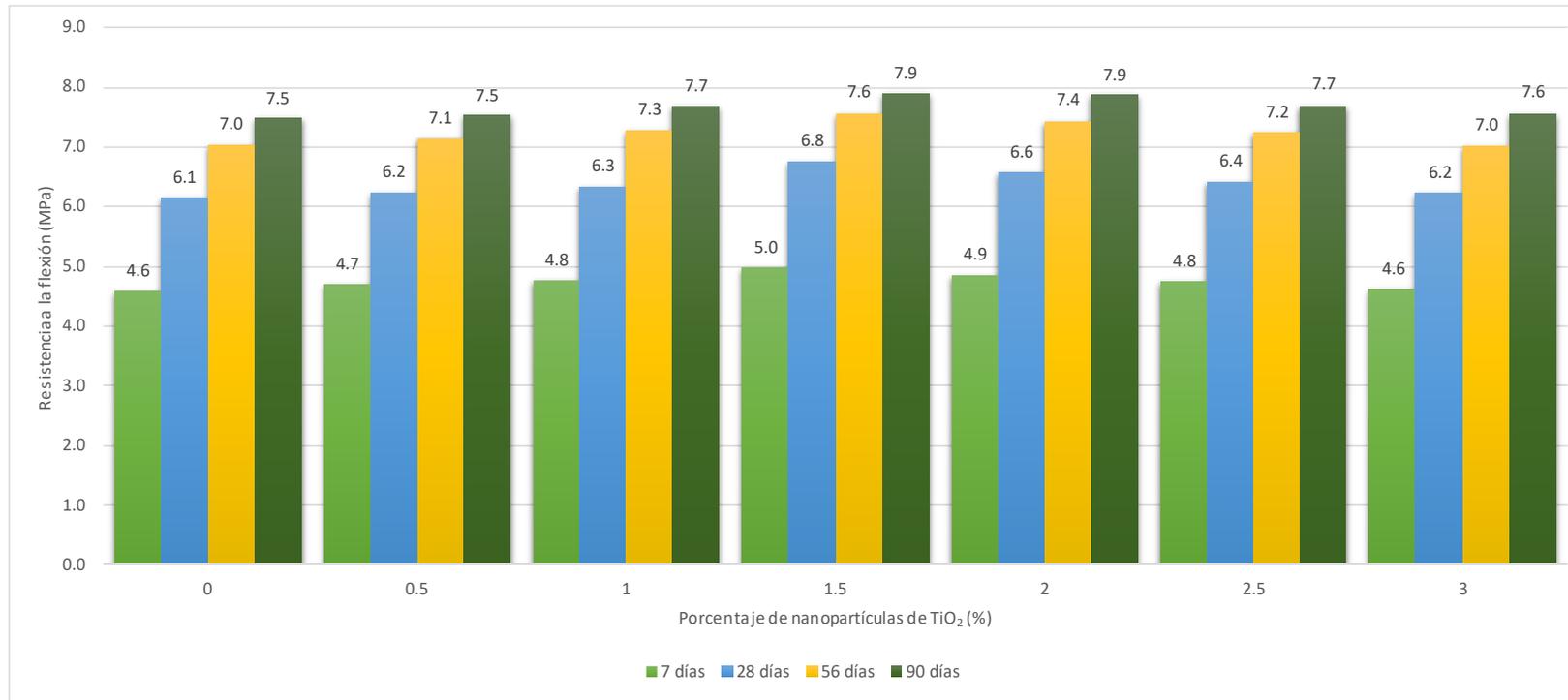
*Resistencia a la flexión a los 7, 28, 56 y 90 días (MPa)*

Nano partículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Resistencia a la flexión (MPa)			
	7 días	28 días	56 días	90 días
0	4.59	6.14	7.04	7.47
0.5	4.70	6.24	7.14	7.52
1	4.77	6.34	7.28	7.68
1.5	4.98	6.76	7.57	7.89
2	4.86	6.57	7.44	7.86
2.5	4.75	6.42	7.24	7.70
3	4.62	6.23	7.02	7.57

*Nota.* Adaptado de Rawat et al. (2023)

**Figura 35**

*Resistencia a la flexión a los 7, 28, 56 y 90 días (MPa)*



*Nota.* Adaptado de Rawat et al. (2023)

**Artículo 10:** El efecto de las nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  sobre la permeabilidad al agua y las propiedades térmicas y mecánicas del hormigón autocompactante de alta resistencia (Nazari & Riahi, 2010, como se citó en Li et al., 2018).

- Tipo de cemento: Cemento Portland ordinario (OPC) conforme a la norma ASTM C150.
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con un tamaño promedio de 15nm,  $45\text{m}^2/\text{g}$  de finura y con pureza al 99.9%.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.40, se utilizaron áridos calizos triturados para producir hormigones autocompactantes, con grava 4/12 y dos tipos de arena: una gruesa 0/4, para áridos finos y otra 0/2, con un contenido alto de muy finos (tamaño de partícula  $<0.063$  mm) de 19.2% cuya función era aportar un mayor volumen de materiales finos para mejorar la estabilidad del hormigón fresco, en la Tabla 47 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- Tipo de aditivos y adiciones: Se empleó un policarboxilato con un aditivo a base de antiespumante de condensado de polietileno (1% en peso de mezcla).
- En la Tabla 48 y Figura 36 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 47**

*Proporción de la mezcla de hormigón con nano- $\text{TiO}_2$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )*

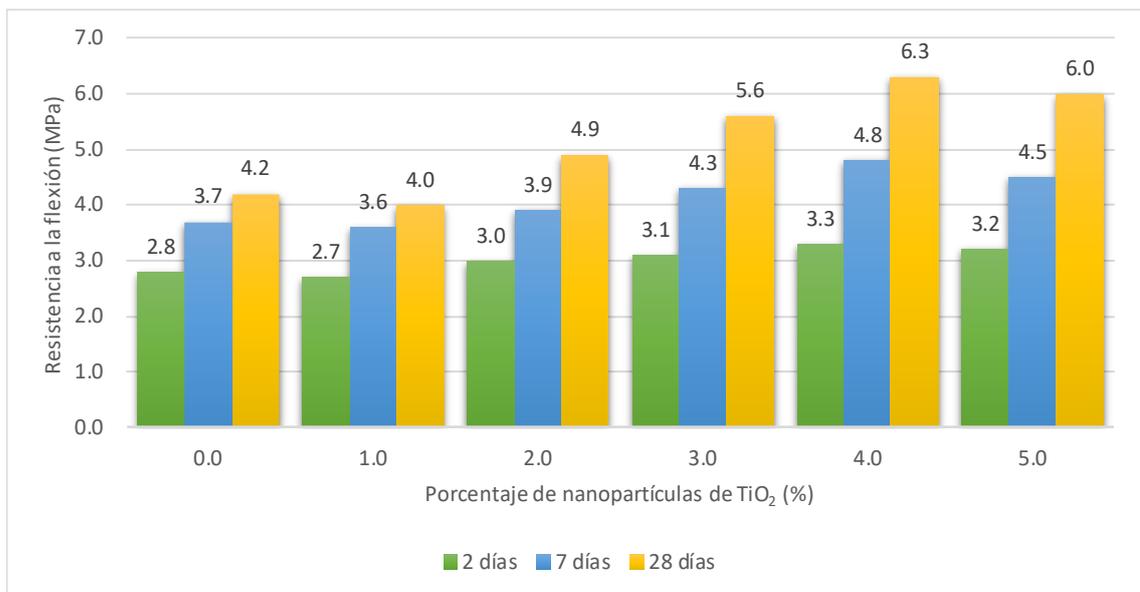
Nano partículas de $\text{TiO}_2$	Contenido de PC (%)	Cantidades ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	
		Cemento	Nano partículas de $\text{TiO}_2$
0.0	1.0	450.00	0.00
1.0	1.0	445.50	4.50
2.0	1.0	441.00	9.00
3.0	1.0	437.50	13.50
4.0	1.0	432.00	18.00
5.0	1.0	427.50	22.50

*Nota.* Extraído de Nazari & Riahi (2010, como se citó en Li et al., 2018)

**Tabla 48***Resistencia a la flexión a los 2, 7 y 28 días (MPa)*

Nano partículas de TiO <sub>2</sub> (%)	Resistencia a la flexión (MPa)		
	2 días	7 días	28 días
0.0	2.8	3.7	4.2
1.0	2.7	3.6	4.0
2.0	3.0	3.9	4.9
3.0	3.1	4.3	5.6
4.0	3.3	4.8	6.3
5.0	3.2	4.5	6.0

*Nota.* Extraído de Nazari & Riahi (2010, como se citó en Li et al., 2018)

**Figura 36***Resistencia a la flexión a los 2, 7 y 28 días (MPa)*

*Nota.* Adaptado de Nazari & Riahi (2010, como se citó en Li et al., 2018)

**Artículo 13:** Información sobre la influencia del nano dióxido de titanio y el nano óxido de zinc en las propiedades mecánicas y la inhibición del refuerzo de acero (Sobhy et al., 2022).

- Tipo de cemento: Cemento Portland ordinario (OPC) grado 42.5 conforme a la norma ASTM C150.
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con un tamaño promedio de 25nm y con pureza al 99%.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.45, el agregado fino fue arena natural con un tamaño máximo nominal (NMS) de 4.75 mm, y el agregado grueso (CA) en este trabajo fue dolomita triturada con un tamaño máximo nominal de 10 mm. Las pruebas de agregado se realizaron de acuerdo con las normas ASTM C128 y ASTM C127, en la Tabla 49 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- En la Tabla 50 y Figura 37 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 49**

*Composición de las mezclas de hormigón con nano-TiO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>)*

TiO <sub>2</sub> (%)	Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Dolomita (kg/m <sup>3</sup> )	Arena (kg/m <sup>3</sup> )	Agua (kg/m <sup>3</sup> )
0	400	1248	625	180
0.5	400	1248	625	180
1	400	1248	625	180
1.5	400	1248	625	180

*Nota.* Extraído de Sobhy et al. (2022)

**Tabla 50**

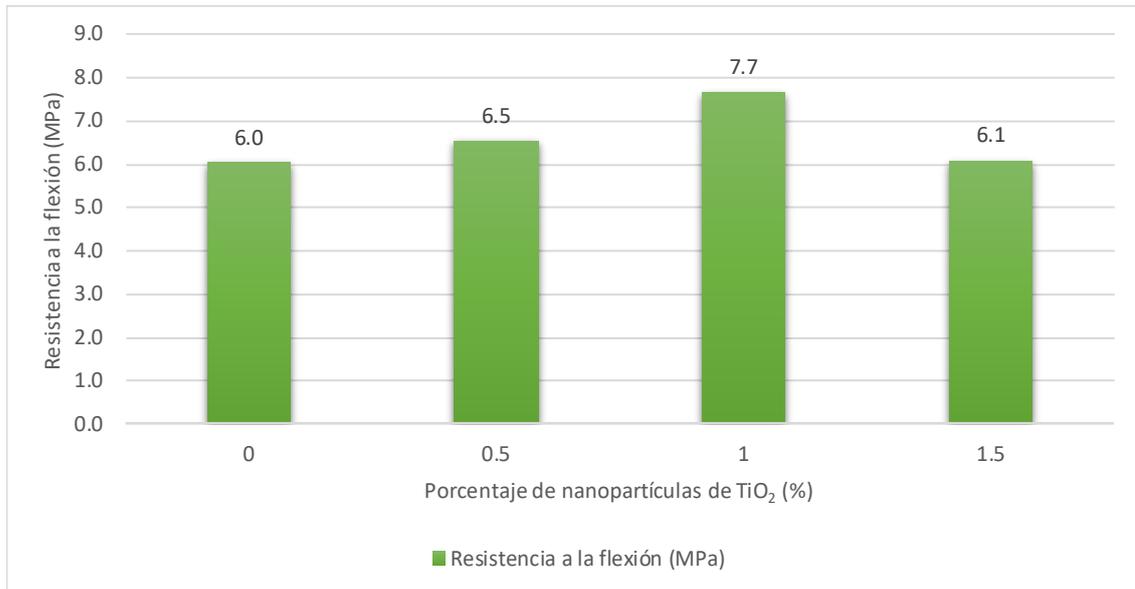
*Resistencia a la flexión a los 28 días (MPa)*

TiO <sub>2</sub> (%)	Resistencia a la flexión (MPa)
0	6.0
0.5	6.5
1	7.7
1.5	6.1

*Nota.* Adaptado de Sobhy et al. (2022)

**Figura 37**

*Resistencia a la flexión a los 28 días (MPa)*



*Nota.* Adaptado de Sobhy et al. (2022)

**Artículo 15:** Investigación experimental del hormigón con dióxido de titanio (Umamaheswari & Monisha, 2019).

- Tipo de cemento: Cemento Portland ordinario (OPC) grado 53.
- Características de las nanopartículas: Nanopartículas de dióxido de titanio con gravedad específica de 4.26 y densidad de 3.82 g/cm<sup>3</sup>.
- Diseño de Mezcla: Relación a/c de 0.43, el agregado fino fue arena natural de río con una gravedad específica de 2.60 y el agregado grueso fue piedra triturada con una gravedad específica de 2.75, en la Tabla 51 se aprecia el diseño de mezcla empleado.
- En la Tabla 52 y Figura 38 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 51**

*Composición de las mezclas de hormigón con nano-TiO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>)*

Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado fino (kg/m <sup>3</sup> )	Agregado grueso (kg/m <sup>3</sup> )	Agua (kg/m <sup>3</sup> )
400	655.11	1133	172.68
1	1.56	2.9	0.43

*Nota.* Extraído de Umamaheswari & Monisha (2019)

**Tabla 52**

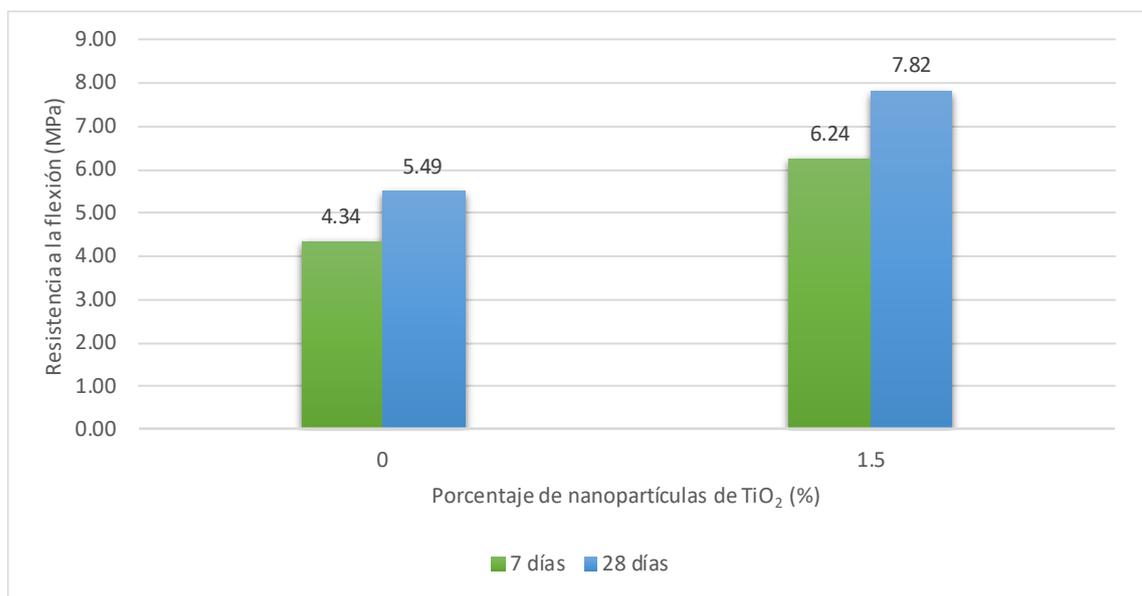
*Resistencia a la flexión a los 7 y 28 días (MPa)*

TiO <sub>2</sub> (%)	Resistencia a la flexión (MPa)	
	7 días	28 días
0	4.34	5.49
1.5	6.24	7.82

*Nota.* Extraído de Umamaheswari & Monisha (2019)

**Figura 38**

*Resistencia a la flexión a los 7 y 28 días (MPa)*



*Nota.* Adaptado de Umamaheswari & Monisha (2019)

## 5.2. Contrastación de hipótesis

### 5.2.1. Contrastación de la primera hipótesis

**HIPÓTESIS 1:** Al determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio se reducen los poros capilares del concreto fotocatalítico.

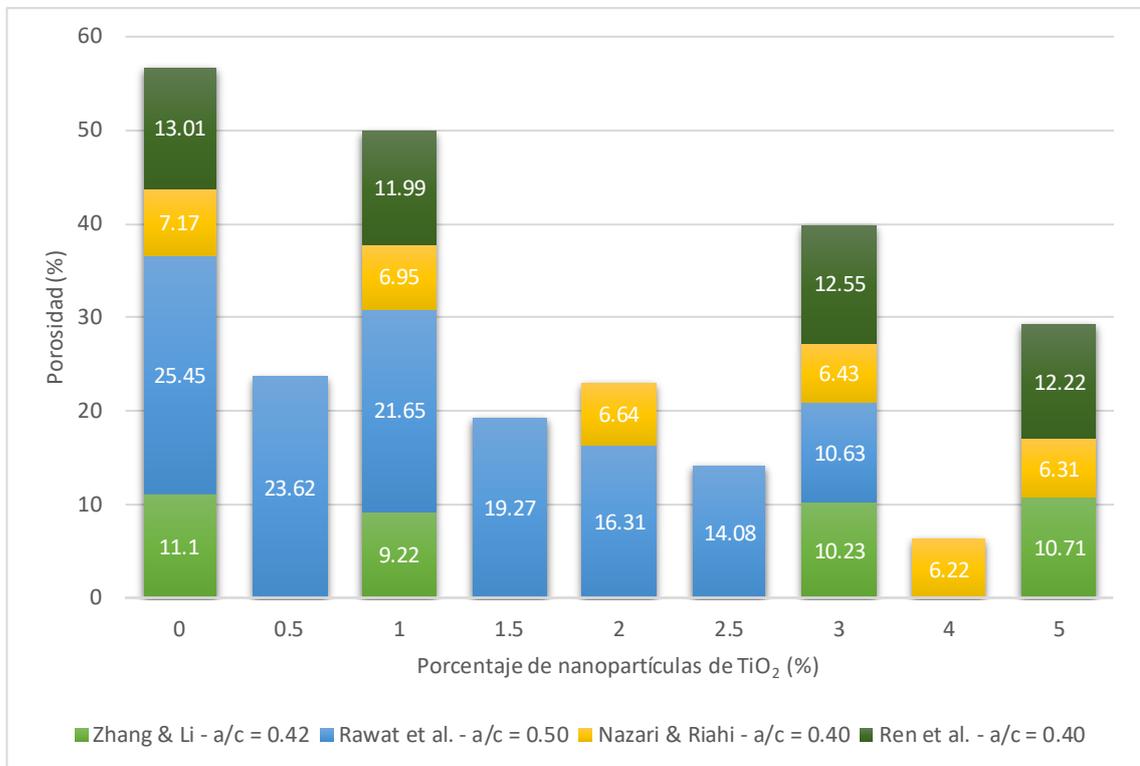
Hipótesis auxiliar:

H<sub>0</sub>: Al determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio no se reducen los poros capilares del concreto fotocatalítico.

H<sub>1</sub>: Al determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio si se reducen los poros capilares del concreto fotocatalítico.

**Figura 39**

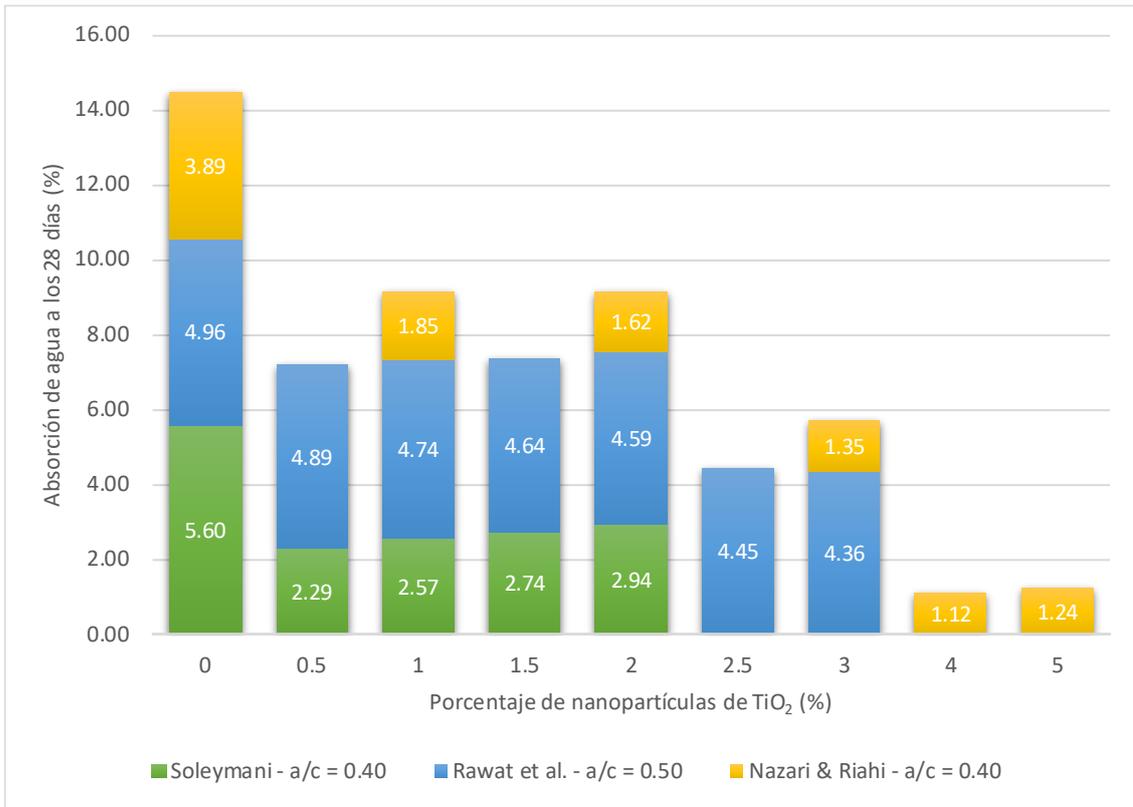
*Porosidad de las muestras de concreto*



*Nota.* Elaboración propia

**Figura 40**

*Absorción de agua a los 28 días de las muestras de concreto*



*Nota.* Elaboración propia

**Observación:**

En la Figura 39, los autores Zhang & Li lograron una mejora en la reducción de la porosidad del 16.9% adicionando 1% de dióxido de titanio, siendo la porosidad de la muestra patrón de 11.10% y la obtenida con las nanopartículas de 9.22%.

Rawat et al. obtuvieron que la adición óptima de nano-TiO<sub>2</sub> fue del 3% obteniendo una porosidad del 10.63% respecto a la muestra patrón de 25.45% reduciéndola en un 58.2%.

Nazari & Riahi redujeron la porosidad en un 13.2% siendo la muestra patrón de 7.17% y la mezcla reducida de un 6.22%, ello se obtuvo con un porcentaje óptimo de TiO<sub>2</sub> de 4%.

Ren et al. demostraron que se puede reducir la porosidad en un 7.8% al adicionar un porcentaje óptimo de TiO<sub>2</sub> de 1%, teniendo como muestra patrón una porosidad de 13.01% y reduciéndolo a un valor de 11.99%.

En la Figura 40 el autor Soleymani obtuvo una reducción de la absorción de agua de un 59.1% con una adición de dióxido de titanio del 0.5%, llevando la muestra patrón de 5.60% a una porosidad de 2.29%.

Rawat et al. lograron una mejora del 12.1% reemplazando parcialmente con un 3% de nanopartículas de dióxido de titanio reduciendo la absorción de agua de 4.96% de la

muestra patrón a un 4.36%.

Nazari & Riahi encontraron que el porcentaje óptimo para reducir la absorción de agua del concreto fue de 4% logrando reducirla en un 71.2%, desde 3.89% de la muestra patrón hasta 1.12%, reduciendo su valor al sustituir parcialmente el  $TiO_2$  en un 4%.

Por lo tanto, se puede afirmar que adicionar nanopartículas de dióxido de titanio ( $TiO_2$ ) entre 0.5% y 4% reduce los poros capilares del concreto fotocatalítico.

Se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ ) ya que como se demuestra la adición de nanopartículas de dióxido de titanio reduce los poros capilares del concreto fotocatalítico.

### 5.2.2. Contrastación de la segunda hipótesis

**HIPÓTESIS 2:** Al determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio reduce la absorción de los iones de cloruro del concreto fotocatalítico.

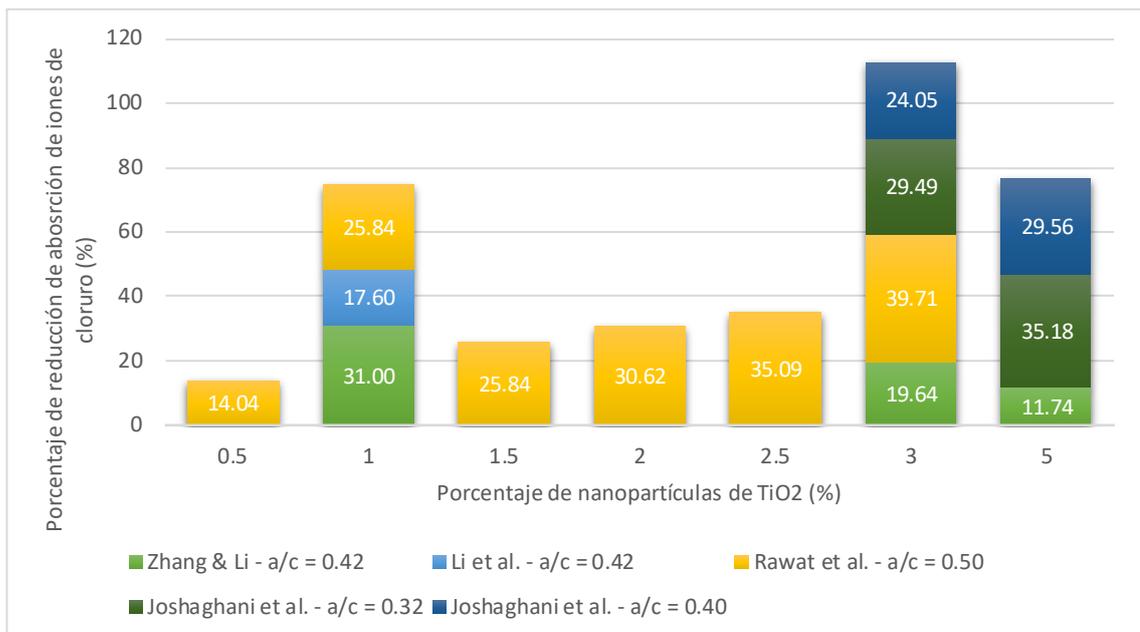
Hipótesis auxiliar:

$H_0$ : Al determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio no reduce la absorción de iones de cloruro del concreto fotocatalítico.

$H_1$ : Al determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio si reduce la absorción de iones de cloruro del concreto fotocatalítico.

#### Figura 41

*Porcentaje de absorción de iones de cloruro de las muestras de concreto*



*Nota.* Elaboración propia

Observación:

En la figura 41, Zhang & Li, nos dan como porcentaje óptimo el valor de 1.0% de nano-TiO<sub>2</sub> nos resulta un aumento del 31.00 % de reducción de absorción de cloruro con respecto a la muestra con una relación agua – cemento de 0.42.

Li et al., en conjunto su porcentaje óptimo es de 1.0% de nano-TiO<sub>2</sub> con un porcentaje de reducción de absorción de cloruro del 17.60% con una relación agua – cemento de 0.42.

Rawat et al., da como porcentaje óptimo el valor de 3.0% de nano-TiO<sub>2</sub> con un porcentaje de reducción de absorción de cloruro del 39.71 %. con una relación agua – cemento de 0.50.

Joshaghani et al., dan como porcentaje optimo el valor de 5.0% de nano-TiO<sub>2</sub> con una reducción de absorción de cloruro del 35.18%, con una relación agua – cemento de 0.32 y con un porcentaje optimo el valor de 5.0% de nano-TiO<sub>2</sub> con una reducción de absorción de cloruro del 29.56%, con una relación agua – cemento de 0.40.

Por lo tanto, se puede afirmar que adicionar nanopartículas de dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) mayores a 1.0% mejora la reducción de absorción de cloruro de un concreto fotocatalítico. Se rechaza la hipótesis nula (H<sub>0</sub>) y se acepta la hipótesis alterna (H<sub>1</sub>) ya que como se demuestra la adición de nanopartículas de dióxido de titanio la reducción de absorción de cloruro de un concreto fotocatalítico.

### 5.2.3. Contrastación de la tercera hipótesis

**HIPÓTESIS 3:** Al determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio incrementa la resistencia a la compresión del concreto fotocatalítico.

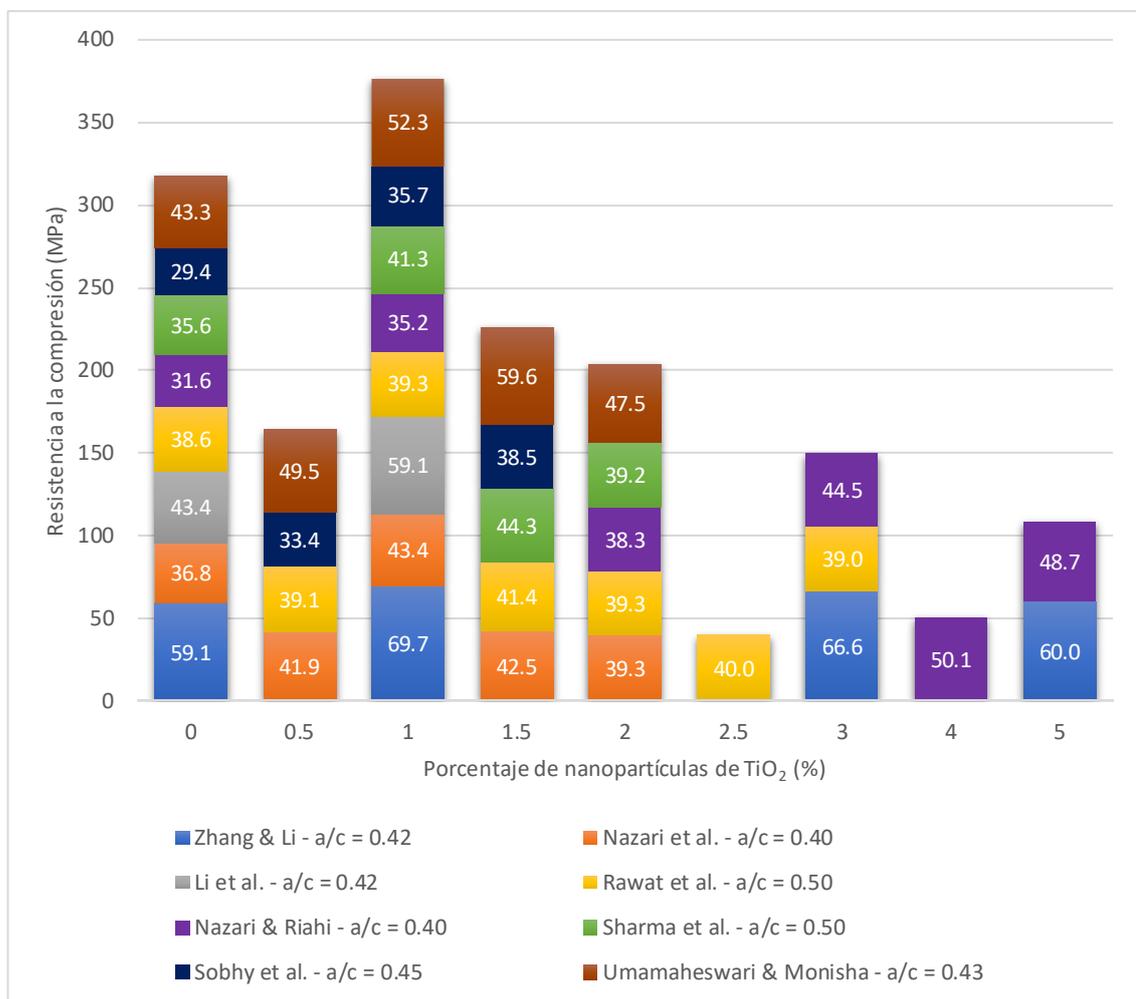
Hipótesis auxiliar:

$H_0$ : Al determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio no incrementa la resistencia a la compresión del concreto fotocatalítico.

$H_1$ : Al determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio si incrementa la resistencia a la compresión del concreto fotocatalítico.

**Figura 42**

*Resistencia a la compresión de los concretos a los 28 días (MPa)*



*Nota.* Elaboración propia

Observación:

En la Figura 42, los autores Zhang & Li muestran que el porcentaje óptimo de nano-TiO<sub>2</sub> se encontró con la adición del 1% obteniendo una resistencia a la compresión de 69.73 MPa logrando una mejora del 18.03% con respecto a la mezcla patrón de 59.1 MPa.

Nazari et al. observaron que el porcentaje óptimo de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  fue de 1% obteniendo una resistencia a la compresión de 43.4 MPa, a su vez se obtuvo un incremento de 17.93% referente a la muestra patrón de 36.8 MPa.

Li et al. mostraron un incremento del 36.18% de la resistencia a la compresión a los 28 días al sustituir parcialmente el cemento con un 1% de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  teniendo una resistencia de 59.1 MPa y 43.4 MPa para la muestra patrón.

Rawat et al. observaron que la resistencia a la compresión más favorable fue de 41.4 MPa, teniendo un incremento de 7.25% respecto a la muestra patrón el cual dio una resistencia de 38.6 MPa cuando se adicionó un 1.5% de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ .

Nazari & Riahi mostraron que el porcentaje óptimo de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  fue de 4% obteniendo una resistencia a la compresión de 50.1 MPa teniendo un incremento del 58.54% con respecto a la mezcla patrón de 31.6 MPa.

Sharma et al. observaron que la resistencia a la compresión más favorable se obtuvo al sustituir parcialmente el cemento por nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  en un 1.5%, logrando una resistencia de 44.3 MPa con un incremento de 24.44% en comparación con la mezcla patrón de 35.6 MPa.

Sobhy et al. demostraron que la resistencia a la compresión más óptima fue de 38.5 MPa mediante una sustitución de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  al 1.5%, obteniendo un incremento de la resistencia del 30.95% respecto a la muestra patrón de 29.4 MPa.

Umamaheswari & Monisha mostraron que el porcentaje más óptimo de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  fue de 1.5% obteniéndose una resistencia a la compresión de 59.6 MPa teniendo un incremento de 37.90% respecto a la mezcla patrón el cual resultó con 43.3 MPa de resistencia.

Por lo tanto, se puede afirmar que adicionar nanopartículas de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) no mayores a 1.5% mejora la resistencia a la compresión del concreto fotocatalítico.

Se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) y se acepta la hipótesis alterna ( $H_1$ ) ya que como se demuestra la adición de nanopartículas de dióxido de titanio mejora la resistencia a la compresión del concreto fotocatalítico.

#### 5.2.4. Contrastación de la cuarta hipótesis

**HIPÓTESIS 4:** Al determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio incrementa la resistencia a la flexión del concreto fotocatalítico.

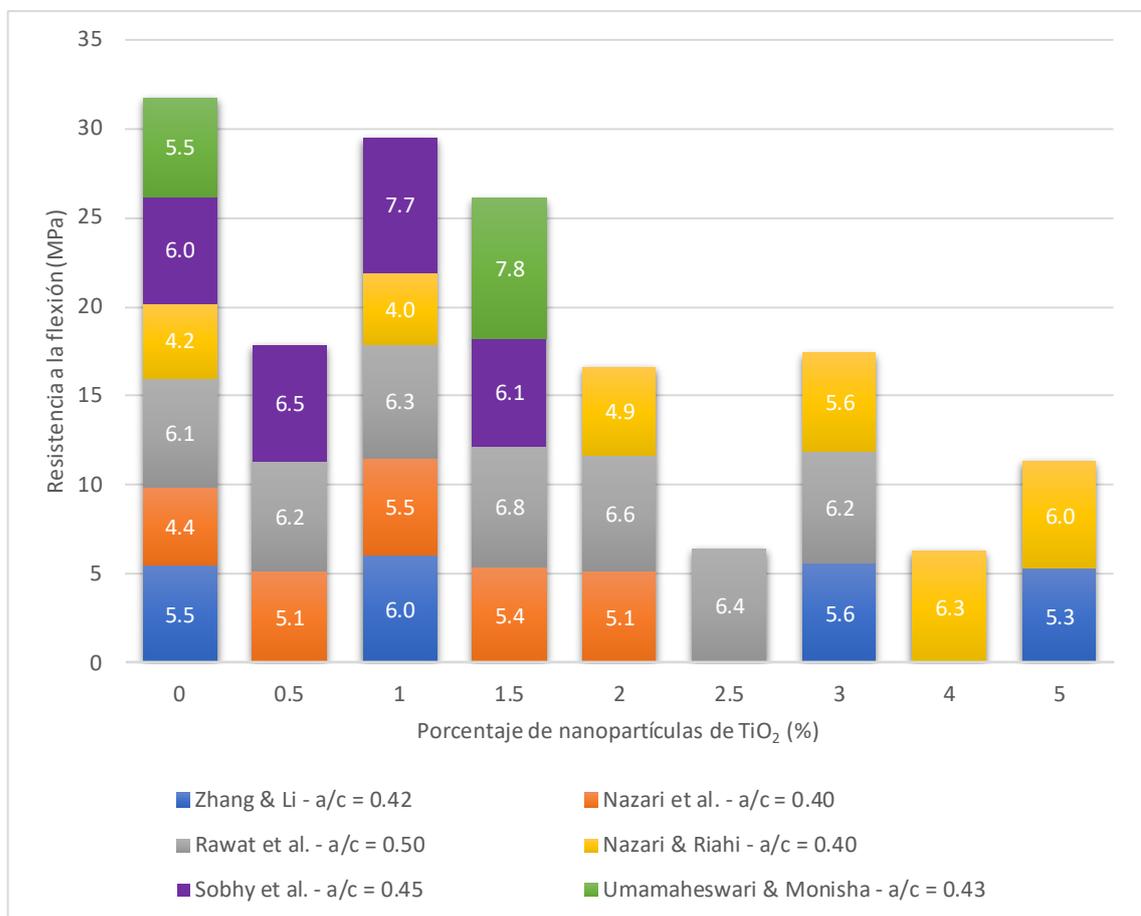
Hipótesis auxiliar:

$H_0$ : Al determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio no incrementa la resistencia a la flexión del concreto fotocatalítico.

$H_1$ : Al determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio si incrementa la resistencia a la flexión del concreto fotocatalítico.

**Figura 43**

*Resistencia a la flexión de los concretos a los 28 días (MPa)*



*Nota.* Elaboración propia

Observación:

Se aprecia en la Figura 43, según Zhang & Li, hacen mención que el porcentaje óptimo de nano-TiO<sub>2</sub> es de 1% dando como resultado el 6.0 MPa como resistencia a la flexión con un porcentaje de mejora del 10.26% con respecto a la muestra patrón.

Nazari et al., dan como porcentaje óptimo de nanoTiO<sub>2</sub> es de 1% como resultado otorga un 5.5 MPa de resistencia a la flexión con un porcentaje de mejora del 25.00% con

respecto a la muestra.

Rawat et al., dan como porcentaje óptimo 1.5% dando como resultado 6.8 MPa por resistencia a la flexión con un porcentaje de mejora del 10.10% con respecto a la muestra.

Nazari & Riahi hacen mención que el porcentaje óptimo de nano-TiO<sub>2</sub> es de 4% brindándonos una resistencia de 6.3 MPa con un porcentaje de mejora del 50.00% con respecto a la muestra.

Sobhy et al., dan como resultado el porcentaje óptimo un valor de 1% con un 7.7 MPa como resistencia a la flexión con un porcentaje de mejora del 27.22% con respecto a la muestra.

Finalmente, Umamaheswari & Monisha, nos dan como porcentaje óptimo de nano-TiO<sub>2</sub> de 1.5% con un 7.8 MPa de resistencia a la flexión con un porcentaje de mejora del 42.44% con respecto a la muestra.

Por lo tanto, se puede afirmar que adicionar nanopartículas de dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) no mayores a 1.5 % mejora la resistencia a la flexión del concreto fotocatalítico.

Se rechaza la hipótesis nula (H<sub>0</sub>) y se acepta la hipótesis alterna (H<sub>1</sub>) ya que como se demuestra la adición de nanopartículas de dióxido de titanio mejora la resistencia a la flexión del concreto fotocatalítico.

## DISCUSIÓN

1. Los resultados obtenidos de los ensayos de porosidad y absorción de agua de las Figuras 39 y 40 extraídos de los artículos que tienen como autores a Zhang & Li, Soleymani, Rawat et al., Nazari & Riahi y Ren et al., se obtuvo como resultado la contrastación de la hipótesis 1. Estos resultados revelaron reducciones en la porosidad, que oscilaron entre el 7.8% y el 58.2%, logrando porosidades que variaron del 6.22% al 11.99%. Además, se observó una disminución en la absorción de agua en un rango del 12.1% al 59.1%, dando como resultado porcentajes de absorción de agua entre el 1.12% y el 4.36%. Estas mejoras se alcanzaron mediante la adición de nanopartículas de TiO<sub>2</sub> en un rango del 0.5% al 4%. La diferencia de resultados entre los autores presentados se debe a las variaciones en las propiedades de absorción de los agregados utilizados en sus estudios.
2. Según los resultados de la Figura 41, Zhang & Li, Li et al., Rawat et al. y Joshaghani et al., se logró constatar la hipótesis 2 con porcentaje óptimo de nanopartículas de dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) en un rango desde el 1% al 5% con porcentajes de reducción de absorción de iones de cloruro entre 17.60% al 39.71%. Finalmente, la discrepancia entre los resultados se debió a la pureza de los agregados, la relación agua-cemento (considerando diferentes PH) y diversos aditivos empleados en los diseños de mezcla.
3. Según los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión de la Figura 42 y de acuerdo a los artículos que tienen como autores a Zhang & Li, Nazari et al., Li et al., Rawat et al., Sharma et al., Sobhy et al. y Umamaheswari & Monisha, se logró contrastar la hipótesis 3, en cual el rango óptimo de nanopartículas de dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) se encuentra entre el 1% al 1.5% teniendo mejoras de resistencia a la compresión en un rango de 7.25% al 37.90% en comparación con la muestra patrón. Esto corresponde a una resistencia a la compresión entre 38.5 MPa y 69.7 MPa, es importante señalar que cuando la adición supera el 1.5%, la resistencia comienza a disminuir. Los autores Nazari & Riahi obtuvieron un porcentaje óptimo de adición del 4%, lo que resultó el incremento de la resistencia a la compresión con respecto a la muestra patrón en un 58.54%, alcanzando un valor de 50.1 MPa. Este resultado se debe a que por parte de los autores mencionados utilizaron un aditivo a base de policarboxilato, lo que mejoró la dispersión del nano-TiO<sub>2</sub> permitiendo tener una mezcla más uniforme y aumentando la resistencia a la compresión.

4. En la presente investigación tomando como referencia la Figura 43, en cuanto a los artículos de Zhang & Li, Nazari et al., Rawat et al., Sobhy et al. y Umamaheswari & Monisha se constató la hipótesis 4, indicando que el resultado de la resistencia a la flexión con porcentajes óptimo de nanopartículas de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) en un intervalo de 1% a 1.5% logra mejoras en un rango del 10.10% al 42.44% respecto a las muestras patrón. Se obtuvieron resistencias a la flexión que van desde los 5.5 MPa hasta los 7.8MPa. Los autores Nazari & Riahi, obtuvieron un porcentaje óptimo de 4% con una resistencia a la flexión de 6.30 MPa lo que implica un aumento del 50% con respecto a la muestra patrón. Se muestra la diferencia de valores de los porcentajes óptimos entre los autores debido a que al utilizar un aditivo plastificante a base de policarboxilato aumenta a un 4% de nano- $\text{TiO}_2$ .

## CONCLUSIONES

1. Las nanopartículas de dióxido de titanio redujeron los poros capilares y la absorción de iones de cloruro, e incrementaron la resistencia a la compresión y a la flexión. El porcentaje óptimo para reducir los poros capilares estuvo en un rango de 0.5% al 4% de nanopartículas de dióxido de titanio, el 3% y el 4% de nanopartículas de dióxido de titanio redujo en un 58.2% la porosidad y en un 71.2% la absorción de agua respectivamente, el porcentaje óptimo para la reducción de absorción de iones de cloruro se encontró en un rango de 1% al 5%, siendo el 3% de nanopartículas de dióxido de titanio quien lo redujo en un 35.18%, con la adición de 1.5% de nanopartículas de dióxido de titanio se logró un incremento de 37.90% y 42.44% en la resistencia a la compresión y a la flexión respectivamente.
2. De los ensayos de porosidad y absorción de agua de las Figuras 39 y 40, se definió que la adición de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  en el rango de 0.5% a 4% reducen los poros capilares del concreto fotocatalítico. Se encontró que las concentraciones de nano- $\text{TiO}_2$  del 3% y el 4% son eficaces reduciendo la porosidad en un 58.2% y la absorción de agua en un 71.2%, respectivamente. Sin embargo, cabe destacar que cuando se supera el 4% de adición de nanopartículas, se observa un incremento en la porosidad y en la absorción de agua. Cuando el concreto presenta una porosidad elevada, el efecto reductor del dióxido de titanio resulta más favorable en comparación al concreto de menor porosidad. Por otro lado, el nanomaterial proporciona una reducción superior en la absorción de agua en concretos de baja porosidad en comparación con mezclas altamente porosas. El porcentaje óptimo va a depender de las propiedades de los agregados que formaran parte de la mezcla de concreto.
3. En los ensayos de reducción de absorción de iones de cloruro de la Figura 41 se concluye que el rango de variación va del 1% al 5% con la adición de nanopartículas de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) en concretos fotocatalíticos. Como valor óptimo se obtiene que el 3% de nanopartículas de dióxido de titanio nos resulta una reducción de absorción de iones de cloruro del 39.71%. Considerando la relación agua-cemento de 0.50 utilizada por Rawat et al., se sabe que la adición de nanopartículas de dióxido de titanio tiene un mejor rendimiento en diseños de mezclas con altas relaciones agua-cemento ya que reduce la permeabilidad, por ende, logra mejorar la reducción de absorción de iones de cloruro.
4. De los ensayos de resistencia a la compresión de la Figura 42 se puede concluir que

el concreto con una adición de dióxido de titanio en un 1.5% nos da resultados óptimos, logrando aumentar la resistencia hasta en un 37.90%, a diferencia de porcentajes de adición por encima de este valor o por debajo del 1%, excepto en un caso particular donde se obtuvo una resistencia a la compresión óptima con un 4% de adición debido al uso del aditivo a base de policarboxilato. En todos los ensayos de la resistencia a la compresión, se observaron mejoras en comparación con la muestra patrón.

5. De los diversos ensayos de resistencia a la flexión de la Figura 43 se concluye que la adición de nanopartículas de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) al concreto con un valor de 1.5% resulta en un incremento de hasta un 42.44% en la resistencia a la flexión en comparación con la muestra patrón. Sin embargo, se observa una disminución en la resistencia a la flexión cuando se añaden nanopartículas en proporciones por encima de este porcentaje e inferiores al 1%. Un caso particular se presenta al utilizar un aditivo superplastificante a base de policarboxilato, el cual permite alcanzar porcentajes óptimos de hasta un 4% en la adición de nanopartículas de dióxido de titanio.

## RECOMENDACIONES

1. Para reducir los poros capilares en concretos fotocatalíticos mediante la adición de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ , es sugerible emplearlos en concretos con una alta porosidad, ya que los resultados obtenidos presentarán un mayor impacto en la reducción de poros capilares que los concretos de baja porosidad, a su vez si se desea reducir drásticamente los porcentajes de absorción de agua, se recomienda emplear la adición de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  en concretos con baja porosidad.
2. En cuanto a la reducción de absorción de iones de cloruro, para adiciones entre 3% y 5% de dióxido de titanio se sugiere utilizar aditivos reductores de agua de alto rango (HRWRA) a base de éter policarboxílico con la finalidad de obtener porcentajes óptimos de reducción de absorción de iones de cloruro. En caso de adiciones alrededor del 1% de dióxido de titanio se recomienda utilizar aditivos reductores de agua de sulfonato de formaldehído de naftaleno.
3. Se sugiere el uso de un aditivo superplastificante a base de policarboxilato para optimizar la resistencia a la compresión cuando se planea incorporar más del 1.5% de nanopartículas de dióxido de titanio. En ausencia de este aditivo, se recomienda no exceder el 1.5% de adición del nanomaterial para evitar resultados por debajo del óptimo.
4. Para optimizar la resistencia a la flexión cuando la adición supera el 1.5% de nanopartículas de dióxido de titanio, se aconseja el empleo de un aditivo superplastificante a base de policarboxilato. En caso de no disponer de este aditivo, se propone limitar la adición del nanomaterial al 1.5% con el objetivo de prevenir resultados que no alcancen el nivel óptimo.
5. Para investigaciones futuras relacionadas con la permeabilidad del concreto fotocatalítico, se aconseja un estudio detallando las propiedades de los agregados y un análisis de su interacción con el dióxido de titanio en relación a los poros capilares y los iones de cloruro. En lo que respecta sobre la resistencia a la compresión y a la flexión, se propone una investigación más profunda sobre el uso del policarboxilato en la mezcla con el objetivo de permitir porcentajes más altos de adición de dióxido de titanio y, por ende, lograr mayores mejoras en las resistencias.

## REFERENCIAS

- Abdalla, J., Thomas, B., Hawileh, R., & Kabeer, K. (2022). Influence of nanomaterials on the workability and compressive strength of cement-based concrete. *Materials Today: Proceedings*, 65, 2073–2076. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.429>
- ACI (American Concrete Institute) Committee 210. (2001). *Guía para la Durabilidad del Hormigón Informado por el Comité ACI 201*.
- Ávila, H. (2018). *Propiedades fotocatalíticas del dióxido de titanio en concreto y mortero* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México-México]. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/92879>
- Bernuy, G., & Flores, H. (2020). *Evaluación de las propiedades mecánicas y capacidad autolimpiable del mortero c/a 1:5 de cemento portland tipo I modificado con dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>), en la ciudad de Lima* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima-Perú]. <https://doi.org/10.19083/tesis/653673>
- Cerna, M., & Galicia, W. (2010). *Vida útil en estructuras de concreto armado desde el punto de vista de comportamiento de material* [Investigación “Premio Antenor Orrego 2010”]. Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo-Perú.
- Chavarry, C., Chavarría, L., Valencia, A., Pereyra, E., Arieta, J., & Rengifo, C. (2020). Hormigón reforzado con vidrio molido para controlar grietas y fisuras por contracción plástica. *Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación*, 4(31), 31–41. <https://doi.org/10.29018/issn.2588-1000vol4iss31.2020pp31-41>
- Coral, R. (2022). *Desempeño mecánico y fotocatalítico del pavimento de concreto hidráulico con adición de dióxido de titanio* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Santiago Antúñez de Mayolo, Huaraz-Perú]. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/5515>
- Enfedaque, A., Al-Assadi, G., Romero, H. L., Gálvez, J., & Zhe, W. (2011). Durabilidad del hormigón frente a los ciclos hielo-deshielo. Evaluación de dos tipos de hormigón. *Anales de Mecánica de La Fractura* 28, 2, 675–680. <http://www.gef.es/Congresos/28/Anales28.asp>
- Estela, A. (2020). *Evaluación de la resistencia a la compresión del concreto en edificaciones en condición de autoconstrucción, Pomalca-Chiclayo* [Tesis de pregrado, Universidad Señor de Sipán, Pimentel-Perú].

<https://hdl.handle.net/20.500.12802/7498>

- González, J. (2015). *El dióxido de titanio como material fotocatalítico y su influencia en la resistencia a la compresión en morteros* [Tesis de pregrado, Universidad de San Buenaventura Seccional Bello, Medellín-Colombia]. <http://hdl.handle.net/10819/3999>
- González, G. (2018). *Fotocatálisis aplicada a los materiales de la construcción* [Tesis de pregrado, Universidad Mayor, Santiago de Chile-Chile]. <http://repositorio.umayor.cl/xmlui/handle/sibum/6827>
- Guillermo, G., & Inocencio, P. (2022). *Propuesta de uso de la fotocatalisis de dióxido de titanio TiO<sub>2</sub> en morteros como agente descontaminante en el distrito de Lima* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima-Perú]. <http://hdl.handle.net/10757/667517>
- Joshaghani, A., Balapour, M., Mashhadian, M., & Ozbakkaloglu, T. (2020). Effects of nano-TiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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>
- Li, H., Xiao, H., Guan, X., Wang, Z., & Yu, L. (2014). Chloride diffusion in concrete containing nano-TiO<sub>2</sub> under coupled effect of scouring. *Composites Part B: Engineering*, 56, 698–704. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.024>
- Li, Z., Ding, S., Yu, X., Han, B., & Ou, J. (2018). Multifunctional cementitious composites modified with nano titanium dioxide: A review. In *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* (Vol. 111, pp. 115–137). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.05.019>
- Masías, K. (2018). *Resistencia a la flexión y tracción en el concreto usando ladrillo triturado como agregado grueso* [Tesis de pregrado, Universidad de Piura, Piura-Perú]. <https://hdl.handle.net/11042/3484>
- Medina, E. (2017). *Influencia del fotocatalizador dióxido de titanio en las propiedades autolimpiables y mecánicas del mortero de cemento - arena 1:4 - Cajamarca* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca-Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/1007>
- Najar, S. (2021). *Evaluación de las propiedades fotocatalíticas de adoquines para obras de infraestructura vial adicionado con TiO<sub>2</sub> (dióxido de titanio) en la ciudad de Arequipa 2021* [Tesis de pregrado, Universidad Católica San Pablo, Arequipa-

- Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12590/16924>
- Nazari, A., & Riahi, S. (2010). The effect of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on water permeability and thermal and mechanical properties of high strength self-compacting concrete. *Materials Science and Engineering A*, 528(2), 756–763. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.074>
- Nazari, A., Riahi, S., Riahi, S., Fatemeh Shamekhi, S., & Khademno, A. (2010a). Assessment of the effects of the cement paste composite in presence TiO<sub>2</sub> nanoparticles. In *Journal of American Science* (Vol. 6, Issue 4). <http://www.americanscience.orgeditor@americanscience.org>
- Nazari, A., Riahi, S., Riahi, S., Fatemeh Shamekhi, S., & Khademno, A. (2010b). Improvement the mechanical properties of the cementitious composite by using TiO<sub>2</sub> nanoparticles. In *Journal of American Science* (Vol. 6, Issue 4). <http://www.americanscience.orgeditor@americanscience.org>
- Nevárez, M., Espinoza, P., Quiroz, F., & Ohtani, B. (2017). Fotocatálisis: inicio, actualidad y perspectivas a través del TiO<sub>2</sub>. In *Avances en Química* (Vol. 12, Issue 3). [www.saber.ula.ve/avancesenquimica](http://www.saber.ula.ve/avancesenquimica)
- Norma Técnica Peruana 339.034. (2015). *CONCRETO. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas*.
- Norma Técnica Peruana 339.078. (2012). *CONCRETO. Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión del concreto en vigas simplemente apoyadas con cargas a los tercios del tramo*.
- Pérez, Á. (2021). *Selección de la alternativa tecnológica verde para el sector de la construcción en Colombia a partir de los impactos ambientales generados por la producción del concreto Portland, fotocatalítico y captador de CO<sub>2</sub>* [Tesis de pregrado, Fundación Universidad de América, Bogotá-Colombia]. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8397>
- Ramirez, D., & Wesso, E. (2019). *Diseño y construcción de un fotorreactor, para la activación y evaluación de desempeño de concreto fotocatalítico* [Tesis de pregrado, Universidad de la Salle, Bogotá-Colombia]. [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_civil/890](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/890)
- Rangel, L., & Molina, J. (2020). *Efecto de la adición de dióxido de titanio en las propiedades mecánicas y de durabilidad en materiales a base de cemento* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia, Bogotá-Colombia].

<https://hdl.handle.net/10983/24943>

- 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>
- Rawat, G., Gandhi, S., & Murthy, Y. I. (2023). Durability Aspects of Concrete Containing Nano-Titanium Dioxide. *ACI Materials Journal*. <https://doi.org/10.14359/51738490>
- 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.jobe.2021.103784>
- Río, A. del. (2008). Patología, reparación y refuerzo de estructuras de hormigón armado de edificación. *E.T.S. Arquitectura (UPM)*.
- Rodríguez, G. (2018). *Resistencia a la compresión del concreto  $f'c=175 \text{ kg/cm}^2$  con tres porcentajes de reemplazo de agregados con concreto reciclado* [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte, Cajamarca-Perú]. <https://hdl.handle.net/11537/13841>
- Sanjuán, M., & Castro, P. (2001). *Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto* (H. Esqueda & R. Huerta, Eds.). IMCYC.
- Segura, D., & Camelo, D. (2019). *Evaluación de las propiedades fotocatalíticas de prefabricados para obras de infraestructura vial en concreto adicionado con dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ )* [Tesis de pregrado, Universidad Piloto de Colombia, Girardot-Colombia]. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/5759>
- 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>
- 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>
- Soleymani, F. (2012). Assessments of the effects of limewater on water permeability of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles binary blended palm oil clinker aggregate-based concrete. In *Journal of American Science* (Vol. 8, Issue 5). <http://www.americanscience.org.76>

- Solís, R., Moreno, É., & Castro, P. (2005). Durabilidad en la estructura de concreto de vivienda en zona costera. *Ingeniería*, 9(1), 13–18.
- Toirac, J. (2004). Patología de la construcción. Grietas y fisuras en obras de hormigón. Origen y prevención. *Ciencia y Sociedad*, 29(1), 72–114. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87029104>
- Umamaheswari, R., & Monisha, S. (2019). Experimental investigation of concrete using titanium dioxide. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 06(05), 2326–2330. [www.irjet.net](http://www.irjet.net)
- Xu, H., Ouyang, S., Liu, L., Reunchan, P., Umezawa, N., & Ye, J. (2014). Recent advances in TiO<sub>2</sub>-based photocatalysis. In *Journal of Materials Chemistry A* (Vol. 2, Issue 32, pp. 12642–12661). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c4ta00941j>
- Zarazua, Y., Paredes, S., Sánchez, J., Avendaño, J., & Flores, S. (2017). Influencia de la irradiación microondas/ultrasonido en la síntesis sol-gel de nanopartículas de dióxido de titanio para su aplicación en fotocatalisis. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(3), 899–909.
- 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>

## ANEXOS

### Anexo A: Matriz de consistencia

Concreto fotocatalítico con adición de nanomateriales de dióxido de titanio para aumentar la durabilidad en elementos exteriores en edificaciones

Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variables	Indicadores	Metodología
¿De qué manera la adición de nanomateriales de dióxido de titanio contribuye a la durabilidad del concreto fotocatalítico?	Determinar la adición de nanomateriales de dióxido de titanio para incrementar la durabilidad del concreto fotocatalítico.	La adición de nanomateriales de dióxido de titanio incrementa la durabilidad del concreto fotocatalítico.	VI: Nanomateriales de dióxido de titanio	Porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio	En esta investigación, se empleó un enfoque deductivo y cuantitativo, utilizando datos de estudios previos para examinar la durabilidad del concreto fotocatalítico. El estudio es descriptivo, explicativo y correlacional, buscando soluciones a la baja durabilidad del concreto fotocatalítico mediante la adición de nanomateriales de dióxido de titanio. Se contrastaron hipótesis a través de gráficos y tablas basados en datos previos, estableciendo una relación entre la cantidad de nanomaterial añadido y la durabilidad del concreto. El diseño de la investigación es observacional, retrospectivo y longitudinal, analizando las variables en diferentes intervalos de tiempo sin manipulación.
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas		Poros capilares	
a) ¿En qué medida el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio contribuye en los poros capilares del concreto fotocatalítico?	a) Determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio para reducir los poros capilares del concreto fotocatalítico.	a) Al determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio se reducen los poros capilares del concreto fotocatalítico.			
b) ¿En qué medida el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio contribuye en la absorción de iones de cloruros del concreto fotocatalítico?	b) Determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio para reducir la absorción de iones de cloruros del concreto fotocatalítico.	b) Al determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio reduce la absorción de iones de cloruros del concreto fotocatalítico.	VD: Durabilidad del concreto	Absorción de iones de cloruros	
c) ¿En qué medida el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio contribuye en la resistencia a la compresión del concreto fotocatalítico?	c) Determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio para incrementar la resistencia a la compresión del concreto fotocatalítico.	c) Al determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio incrementa la resistencia a la compresión del concreto fotocatalítico.		Resistencia a la compresión	
d) ¿En qué medida el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio contribuye en la resistencia a la flexión del concreto fotocatalítico?	d) Determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio para incrementar la resistencia a la flexión del concreto fotocatalítico.	d) Al determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio incrementa la resistencia a la flexión del concreto fotocatalítico.		Resistencia a la flexión	

*Nota.* Elaboración propia

## Anexo B: Matriz de Revisión Bibliográfica

#	TÍTULO	ESPAÑOL	AUTOR	IDEAS PRINCIPALES	SUBTEMAS (indicadores)	MÉTODO	LIMITACIONES	CONCLUSIONES	RECOMENDACIONES	RELEVANCIA	AÑO
1	A critical assessment on the effect of nano-titanium dioxide on the properties of concrete	Una evaluación crítica sobre el efecto de nano-dióxido de titanio sobre las propiedades del hormigón	Garima Rawat, Sumit Gandhi, Yogesh Iyer Murthy	El uso de nano-titanio en el concreto puede mejorar su eficiencia y durabilidad, aumentando la resistencia mecánica y reduciendo la absorción de agua. Sin embargo, puede afectar la trabajabilidad y el tiempo de fraguado. La concentración óptima de nano-titanio varía según las condiciones de curado y otros aditivos.	Resistencia a la compresión y flexión, propiedades mecánicas, estructura de poros y permeabilidad al cloruro, resistencia a la abrasión, y resistencia a la deterioración física y química.	Documental	La falta de estudios a largo plazo y la falta de comparaciones con otros aditivos o materiales modificadores	La incorporación de nano-titanio en el concreto puede mejorar su durabilidad, resistencia mecánica y propiedades de transporte. Sin embargo, se requieren más investigaciones a largo plazo y comparativas para evaluar su efectividad en diferentes condiciones y aplicaciones.	Realizar estudios a largo plazo y comparativos con otros aditivos para evaluar su efectividad en el concreto modificado con nano-titanio	El artículo proporciona una evaluación crítica del efecto del nano-dióxido de titanio en las propiedades del concreto, destacando su capacidad para mejorar la durabilidad y las propiedades mecánicas.	2022
2	Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement	Estructura de poros y permeabilidad a los cloruros del hormigón que contiene nanopartículas para pavimento	Mao-hua Zhang, Hui Li	Este artículo analiza el efecto de las nano-partículas y las fibras de polipropileno en la estructura de poros y la permeabilidad al cloruro del concreto. Se encontró que las nano-partículas refinan la estructura de poros y mejoran la resistencia al cloruro, mientras que las fibras de polipropileno la empeoran. La resistencia al cloruro está relacionada con la resistencia a la compresión del concreto.	La estructura de poros, la permeabilidad al cloruro, la resistencia a la compresión y la resistencia al desgaste y la fatiga. Además, se mencionan adiciones como las nano-partículas y las fibras de polipropileno que tienen un efecto en estas propiedades del concreto.	Experimental	La falta de análisis de otras adiciones y la falta de pruebas a largo plazo.	La adición de nano-partículas refina la estructura de poros del concreto y mejora su resistencia al cloruro, mientras que las fibras de polipropileno empeoran la estructura de poros y disminuyen la resistencia al cloruro.	Se recomienda realizar pruebas a largo plazo para evaluar el efecto de las adiciones en la durabilidad del concreto.	El artículo proporciona información sobre cómo las nano-partículas y las fibras de polipropileno afectan la estructura de poros y la permeabilidad al cloruro del concreto, lo que puede ayudar a mejorar la durabilidad del concreto en aplicaciones de pavimentación.	2011
3	Assessment of the effects of the cement paste composite in presence TiO2 nanoparticles	Evaluación de los efectos del compuesto de pasta de cemento en presencia de nanopartículas de TiO2	Ali Nazari, Shadi Riahi, Shirin Riahi, Seyedeh Fatemeh Shamekhi, A. Khademmo	Este estudio investigó los efectos de agregar nanopartículas de TiO2 al concreto. Los resultados mostraron que agregar hasta un 2.0% de nanopartículas de TiO2 mejoró la resistencia a la compresión del concreto. Sin embargo, también disminuyó la trabajabilidad del concreto. El estudio concluyó que la sustitución parcial del cemento con nanopartículas de TiO2 puede mejorar la resistencia del concreto pero puede disminuir su trabajabilidad.	Se analizó la resistencia a la compresión del concreto y se encontró que agregar hasta un 2.0% de nanopartículas de TiO2 mejoró la resistencia. Sin embargo, también se observó una disminución en la trabajabilidad del concreto. No se menciona el uso de aditivos adicionales en el estudio.	Experimental	El estudio no consideró el uso de aditivos adicionales y no evaluó otras propiedades de durabilidad del concreto.	El estudio concluye que la adición de nanopartículas de TiO2 al concreto mejora su resistencia a la compresión, pero disminuye su trabajabilidad. No se evaluaron otras propiedades de durabilidad y no se utilizaron aditivos adicionales.	Se recomienda utilizar aditivos superplastificantes para contrarrestar la disminución en la trabajabilidad del concreto al agregar nanopartículas de TiO2.	Resume la relevancia/aporte del artículo en un texto entre 20 y 30 palabras.	2010
4	Chloride diffusion in concrete containing nano-TiO2 under coupled effect of scouring	Difusión de cloruros en hormigones que contienen nano-TiO2 bajo efecto acoplado de decapado	Hui Li, Hui-gang Xiao, Xinchun Guan, Zetao Wang, Lei Yu	Este estudio investiga los efectos de la difusión de cloruro y el desgaste en el concreto utilizado en estructuras marinas. Se encontró que el concreto con nano-TiO2 muestra una mejor resistencia a la invasión de cloruro y al desgaste en comparación con el concreto regular. Esto sugiere que el concreto con nano-TiO2 es una buena opción para proteger las estructuras marinas contra la corrosión.	Se analizó la resistencia a la invasión de cloruro y al desgaste del concreto utilizado en estructuras marinas. Además, se utilizó un aditivo llamado nano-TiO2 en el concreto, el cual se encontró que mejora la resistencia a la invasión de cloruro y al desgaste en comparación con el concreto regular.	Experimental	La falta de consideración de otros factores ambientales o de carga que podrían afectar la difusión de cloruro y el desgaste en el concreto. Además, no se mencionan las condiciones específicas de las estructuras marinas utilizadas en el estudio, lo que limita la aplicabilidad de los resultados a otros contextos.	El concreto con nano-TiO2 mostró una mejor resistencia a la difusión de cloruro y al desgaste en comparación con el concreto regular. Esto sugiere que el uso de nano-TiO2 en el concreto puede ser beneficioso para proteger las estructuras marinas contra la corrosión y el desgaste.	Se recomienda el uso de concreto con nano-TiO2 para mejorar la resistencia a la difusión de cloruros y la abrasión por erosión. Se sugiere realizar más investigaciones para evaluar su efectividad a largo plazo.	Este artículo demuestra que el concreto con nano-TiO2 tiene una mejor resistencia a la difusión de cloruro y al desgaste, lo cual es relevante para proteger estructuras marinas contra la corrosión.	2013
5	Assessments of the effects of lime water on water permeability of TiO2 nanoparticles binary blended palm oil clinker aggregate-based concrete	Evaluaciones de los efectos del agua de cal en la permeabilidad al agua de nanopartículas de TiO2 en concreto a base de agregados de palmea de mezcla binaria	Farzad Soleymani	Este artículo examina el uso de nanopartículas de TiO2 en la producción de concreto para mejorar sus propiedades y rendimiento. Los resultados muestran que las nanopartículas de TiO2 reducen la absorción de agua y mejoran la microestructura del concreto. Además, se discuten otros factores que afectan la resistencia y trabajabilidad del concreto, como el tamaño de partícula y la adición de ceniza de cáscara de arroz.	En el artículo se discuten las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad del concreto, como la resistencia a la flexión, la absorción de agua y la permeabilidad al agua. Se utilizó nanopartículas de TiO2 como aditivo adicional para mejorar estas propiedades.	Experimental	Las restricciones de esta investigación incluyen el uso de un solo tipo de aditivo (nanopartículas de TiO2) y la falta de comparación con otros aditivos. Además, los resultados pueden no ser generalizables a todas las mezclas de concreto debido a las variaciones en los materiales y las condiciones de curado.	Las conclusiones de este estudio indican que la adición de nanopartículas de TiO2 al concreto puede mejorar su resistencia a la flexión y reducir la absorción de agua. Además, se observó que el curado en agua de cal produce mejores resultados en términos de permeabilidad al agua.	Se recomienda realizar más investigaciones para evaluar el efecto de diferentes aditivos y condiciones de curado en las propiedades del concreto.	Este artículo es relevante ya que demuestra que la adición de nanopartículas de TiO2 puede mejorar las propiedades y durabilidad del concreto, reduciendo su impacto ambiental.	2012
6	Improvement the mechanical properties of the cementitious composite by using TiO2 nanoparticles	Mejora de las propiedades mecánicas del compuesto cementoso mediante el uso de nanopartículas de TiO2	Ali Nazari, Shadi Riahi, Shirin Riahi, Seyedeh Fatemeh Shamekhi, A. Khademmo	Este estudio investiga el uso de nanopartículas de TiO2 en el concreto. Los resultados muestran que el reemplazo parcial de cemento con nanopartículas de TiO2 hasta un nivel máximo del 2.0% mejora la resistencia a la tracción y flexión del concreto, pero disminuye el tiempo de fraguado.	El artículo discute las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad del concreto, incluyendo la resistencia a la tracción y flexión. No se menciona el uso de ningún material o aditivo adicional en el resumen del artículo.	Experimental	Las limitaciones de esta investigación incluyen la falta de análisis de otros aditivos o materiales adicionales y la falta de pruebas a largo plazo para evaluar la durabilidad del concreto.	El reemplazo parcial de cemento con nanopartículas de TiO2 hasta un nivel máximo del 2.0% mejora la resistencia a la tracción y flexión del concreto. Sin embargo, disminuye el tiempo de fraguado.	Se sugiere realizar pruebas a largo plazo para evaluar la durabilidad del concreto y analizar el efecto de otros aditivos o materiales adicionales en las propiedades del concreto.	Este artículo demuestra que el uso de nanopartículas de TiO2 en el concreto puede mejorar sus propiedades mecánicas, lo que puede tener un impacto significativo en la industria de la construcción.	2010

Nota. Elaboración propia

#	TÍTULO	ESPAÑOL	AUTOR	IDEAS PRINCIPALES	SUBTEMAS (indicadores)	MÉTODO	LIMITACIONES	CONCLUSIONES	RECOMENDACIONES	RELEVANCIA	AÑO
7	Durability Aspects of Concrete Containing Nano-Titanium Dioxide	Aspectos de durabilidad del hormigón que contiene Nano-Dióxido de Titanio	Garima Rawat, Sumit Gandhi, Yogesh Iyer Murthy	Este artículo investiga los efectos de reemplazar el cemento con dióxido de titanio nano (NT) en el concreto. Se encontró que el NT mejora la durabilidad y resistencia del concreto, reduce la absorción de agua y la penetración de cloruro. También se mencionan otros nanomateriales utilizados en el concreto.	En el artículo se discuten las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad del concreto, incluyendo resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, absorción de agua, penetración de cloruro y microestructura. No se menciona el uso de aditivos adicionales en el estudio.	Experimental	Las limitaciones de esta investigación incluyen la falta de análisis de otros aditivos adicionales y la falta de pruebas a largo plazo para evaluar la durabilidad a largo plazo del concreto modificado con nanomateriales.	Las conclusiones de este estudio indican que la adición de dióxido de titanio nano (NT) mejora las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad del concreto. Se observó una disminución en la absorción de agua, la penetración de cloruro y una mejora en la microestructura del concreto.	Se sugiere realizar más investigaciones a largo plazo para evaluar la durabilidad a largo plazo del concreto modificado con nanomateriales y analizar el efecto de otros aditivos adicionales en el concreto.	Este artículo es relevante ya que demuestra que la adición de dióxido de titanio nano mejora las propiedades y durabilidad del concreto, lo cual puede tener aplicaciones en la industria de la construcción.	2023
8	Multifunctional cementitious composites modified with nano titanium dioxide: A review	Compuestos cementosos multifuncionales modificados con nano dióxido de titanio: una revisión	Zhen Li, Siji Ding, Xun Yuc, Baoguo Hana, Jinping Oua	Este artículo revisa el uso de nanopartículas de dióxido de titanio (NT) en materiales cementicios. Las NT mejoran las propiedades de los materiales, como la resistencia y la porosidad. Además, afectan la estructura de los poros y la hidratación del cemento. Se discuten los desafíos y el futuro desarrollo de estos materiales.	En el artículo se discuten las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad del concreto, incluyendo la resistencia, porosidad, permeabilidad al agua y resistencia a la penetración de iones de cloruro. Se utilizan nanopartículas de dióxido de titanio (NT) como aditivo en los materiales cementicios.	Documental	Las restricciones de esta investigación incluyen la falta de estudios a largo plazo, la variabilidad en las condiciones de prueba y la falta de comparación con otros aditivos o materiales.	Las nanopartículas de dióxido de titanio (NT) mejoran las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad del concreto. Se observó una disminución del 11% en la pérdida de resistencia después de 300 ciclos de congelación y descongelación. Además, se logró una eficiencia de degradación de compuestos orgánicos del 78%.	Se sugiere realizar más investigaciones para verificar los efectos de las nanopartículas de dióxido de titanio (NT) en los materiales cementicios. Además, se propone establecer un marco sistemático del mecanismo de acción de las NT y explorar métodos eficientes de fabricación de los materiales.	Este artículo es relevante ya que proporciona una visión integral sobre el uso de nanopartículas de dióxido de titanio en materiales cementicios, destacando sus propiedades, aplicaciones y desafíos, lo que contribuye al desarrollo de materiales de alto rendimiento y durabilidad.	2018
9	Influence of Nano-Materials in High Strength Concrete	Influencia de los nanomateriales en el hormigón de alta resistencia	Abdul Rahim & Sandanu, R.Nair	El estudio comparó la influencia de diferentes nanomateriales en el concreto de alta resistencia. El concreto con nano sílice y nano óxido de titanio mostró las mejores propiedades mecánicas y durabilidad. El uso de nanomateriales mejora la resistencia y durabilidad del concreto.	El estudio comparó las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad del concreto de alta resistencia con la adición de nanomateriales como la nano sílice y el nano óxido de titanio. No se menciona el uso de aditivos adicionales.	Experimental	Las restricciones de esta investigación incluyen la falta de consideración de otros nanomateriales y la falta de pruebas a largo plazo.	El estudio concluye que la adición de nanomateriales como la nano sílice y el nano óxido de titanio mejora las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto. Sin embargo, se deben considerar restricciones como la falta de pruebas a largo plazo y la exclusión de otros nanomateriales.	Se recomienda realizar pruebas a largo plazo para evaluar la durabilidad de los nanomateriales en el concreto. Además, se sugiere investigar otros nanomateriales y su efecto en las propiedades del concreto.	El artículo demuestra la influencia positiva de los nanomateriales en el concreto, mejorando su resistencia y durabilidad, lo cual es relevante para aplicaciones en la construcción.	2016
10	The effect of TiO2 nanoparticles on water permeability and thermal and mechanical properties of high strength self-compacting concrete	El efecto de las nanopartículas de TiO2 sobre la permeabilidad al agua y las propiedades térmicas y mecánicas del hormigón autocompactante de alta resistencia	Ali Nazari, Shadi Riahi	Este estudio demuestra que la adición de nanopartículas de TiO2 mejora la resistencia y la permeabilidad al agua del hormigón autocompactante de alta resistencia. Las nanopartículas aceleran la formación de gel C-S-H y actúan como nanorellenos para mejorar la estructura porosa del hormigón.	En el artículo se habla sobre las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad del concreto, incluyendo resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia a la tracción y permeabilidad al agua. No se menciona el uso de ningún aditivo adicional.	Experimental	Las restricciones de esta investigación incluyen el uso de un solo tipo de nanopartículas (TiO2) y la falta de evaluación de otros aditivos adicionales.	Las conclusiones de este estudio indican que la adición de nanopartículas de TiO2 mejora la resistencia y la permeabilidad al agua del hormigón autocompactante de alta resistencia. Las nanopartículas aceleran la formación de productos hidratados y actúan como nanorellenos para mejorar la estructura porosa del hormigón.	Se recomienda realizar estudios con un curado prolongado, el aumento de las edades y los porcentajes de nanopartículas de TiO2 puede conducir a una reducción de los vacíos permeables.	Este artículo es relevante ya que demuestra que la adición de nanopartículas de TiO2 puede mejorar las propiedades mecánicas y físicas del hormigón autocompactante de alta resistencia.	2010
11	Effects of Nano-TiO2 on the Toughness and Durability of Cement-Based Material	Efectos de Nano-TiO2 en la tenacidad y durabilidad de Material a base de cemento	Baoguo Ma, Hainan Li, Junpeng Mei, Xiangguo Li, and Fangjie Chen	Este artículo investiga los efectos de nano-TiO2 en la resistencia y durabilidad de materiales a base de cemento. Se encontró que la adición del 3% de nano-TiO2 aumenta significativamente la resistencia a la tracción y flexión de los morteros de cemento, mejora la formación de cristales AFT, refina los poros de los morteros y reduce la absorción de agua y la permeabilidad al vapor de agua.	El artículo analiza las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad del concreto, incluyendo la resistencia a la tracción y flexión, formación de cristales AFT, porosidad, absorción de agua y permeabilidad al vapor de agua. No se menciona el uso de aditivos adicionales.	Experimental	Las restricciones de esta investigación incluyen la falta de análisis de otros aditivos adicionales y la falta de pruebas en condiciones ambientales diferentes.	Las conclusiones de este estudio indican que la adición de nano-TiO2 en morteros de cemento mejora la resistencia a la tracción y flexión, la formación de cristales AFT, la porosidad y reduce la absorción de agua y permeabilidad al vapor de agua.	Se sugiere realizar más investigaciones para examinar los efectos de nano-TiO2 en otros aditivos y en diferentes condiciones ambientales.	Este artículo es relevante ya que demuestra que la adición de nano-TiO2 mejora la resistencia y durabilidad de los materiales a base de cemento, lo que puede tener aplicaciones en la construcción.	2015
12	Effect of Fly Ash and Nano Titanium Dioxide on Compressive Strength of Concrete	Efecto de las cenizas volantes y el dióxido de titanio nano en la resistencia del hormigón	Sumit Sharma, Inderpreet Kaur, Sushant Gupta	Este artículo investiga el efecto de la ceniza volante y el dióxido de titanio nano en la resistencia a compresión del concreto. Se encontró que la adición de 1.5% de dióxido de titanio nano mejora la resistencia a compresión, independientemente del contenido de ceniza volante. Se mencionan otros estudios relacionados con el uso de nanopartículas en el concreto.	El artículo discute las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad del concreto, incluyendo la resistencia a compresión. Se utilizó ceniza volante y dióxido de titanio nano como aditivos adicionales en diferentes proporciones para mejorar estas propiedades.	Experimental	Las restricciones de esta investigación incluyen la falta de análisis de otras propiedades físico-mecánicas y de durabilidad del concreto, así como la falta de consideración de otros aditivos o materiales adicionales.	El estudio encontró que la adición de 1.5% de dióxido de titanio nano mejora la resistencia a compresión del concreto, independientemente del contenido de ceniza volante. No se mencionan resultados numéricos específicos sobre las mejoras en otras propiedades físico-mecánicas o de durabilidad del concreto.	El artículo sugiere que la adición de 1.5% de dióxido de titanio nano en el concreto con reemplazo parcial de ceniza volante puede mejorar significativamente su resistencia a la compresión.	Este artículo es relevante ya que investiga el efecto de la ceniza volante y el dióxido de titanio nano en la resistencia a compresión del concreto, lo cual puede mejorar las propiedades y durabilidad del material.	2019
13	Insights on the influence of nano-Titanium dioxide and nano-Zinc oxide on mechanical properties and inhibiting of steel reinforcement	Información sobre la influencia del nanodióxido de titanio y el nanooxido de zinc en las propiedades mecánicas y la inhibición del refuerzo de acero	Caroline S. Sobhy, Taber A. Tawfik, G.M. Abd El Hafez, A. Serag Faried	Este estudio investigó el efecto de nano-Titanio dióxido (NT) y nano-Zinc óxido (NZ) en las propiedades mecánicas y la tasa de corrosión del acero de refuerzo en concreto. Los resultados mostraron que NT mejoró las propiedades mecánicas, mientras que NZ redujo la tasa de corrosión.	El estudio investigó las propiedades físico-mecánicas del concreto, como la resistencia a la compresión y flexión, así como la durabilidad del concreto en términos de la tasa de corrosión del acero de refuerzo.	Experimental	Las limitaciones de esta investigación incluyen el tamaño reducido de las muestras, la falta de aditivos adicionales y la falta de pruebas a largo plazo.	Los resultados indicaron que las muestras de hormigón que contenían NT lograron los mejores resultados en comparación con las muestras de hormigón que contenían NZ en cuanto a propiedades mecánicas. El rango de mejora de las muestras NT fue de aproximadamente 6% a 36% para la resistencia a la compresión y de 8% a 27% para la resistencia a la flexión.	Se deben realizar estudios a largo plazo para evaluar el rendimiento a largo plazo de muestras de hormigón de nanooxido de titanio (NT) y nanozinc (NZ).	Este artículo es relevante ya que investiga el efecto de nano-Titanio dióxido (NT) y nano-Zinc óxido (NZ) en las propiedades y durabilidad del concreto, lo cual puede contribuir al desarrollo de materiales de construcción más eficientes y duraderos.	2022

Nota. Elaboración propia

#	TÍTULO	ESPAÑOL	AUTOR	IDEAS PRINCIPALES	SUBTEMAS (indicadores)	MÉTODO	LIMITACIONES	CONCLUSIONES	RECOMENDACIONES	RELEVANCIA	AÑO
14	Effect of Nano Titanium Dioxide on the Permeability and Compression Strength of Concrete	Efecto del Dióxido de Titanio Nano en la Permeabilidad y Resistencia a la Compresión del Concreto	Hamidreza Esmacili, Alireza Hajiani Boushehrian	Estudio de la permeabilidad y resistencia a la compresión del concreto para encontrar un valor óptimo de acuerdo con su adición de dióxido de titanio reduciendo la profundidad de penetración del agua y el coeficiente de permeabilidad del hormigón y de igual manera para mejorar la durabilidad y resistencia.	La nanotecnología ofrece nuevas posibilidades para mejorar las propiedades del hormigón y otros materiales de construcción de igual manera, la investigación sobre uso de nanopartículas de dióxido de titanio en el hormigón está en curso y se están explorando diferentes aplicaciones y proporciones.	Experimental	Las limitaciones de esta investigación va de acuerdo con la falta de mas porcentajes de adición de nanopartículas, de las cuales no aportan mas analisis en un intervalo mas corto	Los resultados experimentales indican que la adición de partículas de dióxido de titanio hasta un porcentaje óptimo en el concreto provoca un aumento significativo en la resistencia a la compresión y una disminución notable en la permeabilidad del concreto con respecto a las muestras de evidencia. La adición de partículas en más del porcentaje óptimo hace que la resistencia a la compresión del hormigón se reduzca en comparación con la muestra con el porcentaje óptimo.	Realizar estudios complementarios para poder determinar un rango certero y óptimo para maximizar la resistencia a la compresión y minime la permeabilidad del hormigón.	De acuerdo al artículo se han realizado diferentes mezclas de concreto con diversos porcentajes de dióxido de titanio y de igual manera las pruebas de resistencia a la compresión y permeabilidad al agua	2020
15	Experimental investigation of concrete using titanium dioxide	Investigación experimental del hormigón con dióxido de titanio	Dr.R.Umaheswari, S.Monisha	En esta investigación se empleo para la reducción de contaminación del aire mediante un concreto fotocatalitico con adición de dióxido de titanio, de igual manera el comportamiento a la compresión y agritamiento de una estructura y comprobar la resistencia a la flexión del concreto.	Mejorar la resistencia para medir su calidad, y el comportamiento del concreto ante la adición de dióxido de titanio con diferentes porcentajes de concreto.	Experimental	Una limitación de acuerdo a la investigación es la recolección de datos para la tabla de resultados que se ven afectados por un incremento de la adición de dióxido de titanio.	Después de 28 días de curado, se realizaron pruebas experimentales de concreto endurecido, como prueba de resistencia a la tracción dividida, prueba de resistencia a la compresión y prueba de resistencia a la flexión. Con una sustitución del 1.5 % de dióxido de titanio (TiO2) por peso de cemento, se logró la máxima resistencia.	Se debe realizar más pruebas con proporciones superiores a 2% de adición de dióxido de titanio para poder encontrar el valor superior óptimo de rotura y esfuerzo de carga que se aplica a la estructura de concreto.	De acuerdo con las investigaciones que se realizaron todo fue indicado para poder mejorar la calidad del concreto y de tal manera su resistencia.	2019
16	Nano-TiO2 particles: a photocatalytic admixture to amp up the performance efficiency of cementitious composites	Partículas de nano-TiO2 : una mezcla fotocatalitica para amplificar aumentar la eficiencia de rendimiento de los compuestos cementosos	Sujay Raghavendra Naganna, K Jayakesh, V R Anand	La inclusión de partículas de nano-TiO2 mejora las propiedades de resistencia y durabilidad de los compuestos cementicios. Además, reduce la porosidad del concreto y afecta las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto compuesto. El estudio concluye que el nano-TiO2 puede ser un aditivo beneficioso para mejorar el rendimiento de los compuestos de cemento.	El subtema de la investigación es el efecto de las partículas de nano-TiO2 en las propiedades de los compuestos cementicios, incluyendo la resistencia, durabilidad, porosidad y propiedades mecánicas del concreto. También se analiza el impacto de las partículas de nano-TiO2 en la absorción de agua, permeabilidad y sorptividad del concreto.	Experimental	Las limitaciones de esta investigación incluyen la falta de pruebas a largo plazo y la falta de consideración de otros factores que podrían influir en las propiedades del concreto.	La rugosidad y los defectos superficiales de los agregados gruesos se alivian en gran medida debido a la incorporación de partículas de nano-TiO2 en probetas de hormigón. La tasa de evolución del calor aumentó durante las primeras etapas de hidratación debido a la alta finura y superficies reactivas adicionales inducidos por el nano-TiO2 partículas mezcladas en compuesto cemento. Además, con referencia a las características de resistencia y durabilidad, los compuestos combinados con nano-TiO2 se desempeñaron relativamente mejor que las muestras de control.	la durabilidad a largo plazo de los compuestos de cemento con partículas de nano-TiO2. Además, se sugiere considerar otros factores que podrían influir en las propiedades del concreto, como la temperatura, la humedad y la presencia de otros aditivos.	esta investigación radica en su contribución al campo de los compuestos cementicios al explorar el uso de partículas de nano-TiO2 para mejorar su rendimiento y durabilidad. Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa para la industria de la construcción, permitiendo el desarrollo de materiales más resistentes y duraderos.	2020
17	Study on the mechanical properties of the nanococoncrete using nano-TiO2 and nanoaclay	Estudio de las propiedades mecánicas del nanohormigón utilizando nano-TiO2 y nanoarcilla	S.D. Anitha Selvasofia, E. Sarojini, G. Moulicha, Sajn Thomas, M. Thirani, P.T Saravankumar, P. Manoj Kumar	El estudio investiga el efecto de las nanopartículas de TiO2 y nanoarcilla en el concreto para mejorar sus propiedades mecánicas. Se encontró que la adición de nano TiO2 y nanoarcilla mejora la resistencia y la durabilidad del concreto. La proporción óptima para lograr la máxima resistencia en compresión y tracción dividida fue de 2.0% de nano TiO2 y 3.0% de nanoarcilla.	El estudio sugiere que los concretos nanomodificados tienen el potencial de mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Se sugiere realizar más investigaciones para evaluar otras propiedades mecánicas del concreto, como la resistencia al impacto y la dureza.	Experimental	El estudio se centró en las propiedades mecánicas del concreto modificado con nano TiO2 y nanoarcilla, pero no se exploraron otras propiedades importantes como la resistencia al impacto, la durabilidad a largo plazo y la resistencia a la corrosión	La adición de nanopartículas de TiO2 y nanoarcilla al concreto mejora sus propiedades mecánicas, como la resistencia a la compresión, tracción dividida y flexión. La proporción óptima de nano TiO2 y nanoarcilla para obtener la máxima resistencia en el concreto es del 2.0% de nano TiO2 y 3.0% de nanoarcilla. Los concretos nanomodificados tienen el potencial de mejorar las propiedades mecánicas del concreto, lo que puede llevar a una mayor durabilidad y resistencia en aplicaciones de construcción.	Es importante considerar los posibles efectos adversos de las nanopartículas en la salud humana y el medio ambiente al utilizarlas en materiales de construcción. Se recomienda realizar estudios adicionales para evaluar la seguridad y sostenibilidad de los concretos nanomodificados.	La relevancia del estudio radica en el potencial de mejorar las propiedades mecánicas del concreto mediante la adición de nanopartículas de TiO2 y nanoarcilla. Esto es importante en la industria de la construcción, ya que el concreto es uno de los materiales más utilizados en la infraestructura y las estructuras de edificios. Mejorar su resistencia y durabilidad puede llevar a una mayor seguridad y vida útil de las estructuras.	2021
18	Effects of nano-TiO2, nano-Al2O3, and nano-Fe2O3 on rheology, mechanical and durability properties of self-consolidating concrete (SCC): An experimental study	Efectos de nano-TiO2, nano-Al2O3 y nano-Fe2O3 en propiedades reológicas, mecánicas y de durabilidad del hormigón autocompactante (SCC): un estudio experimental	Alireza Jashaghani, Mohammad Balapur, Mohammad Mashhadani, Togy Ozbakkaloglu	El objetivo de este estudio es evaluar y comparar los efectos de diferentes nanopartículas, a saber, nano-TiO2, nano-Al2O3 y nano-Fe2O3, sobre el desempeño del hormigón autocompactante (SCC) en términos de propiedades frescas, mecánicas y de durabilidad, mediante la realización de diferentes experimentos.	se investigó la resistencia a la compresión del concreto y para las propiedades de durabilidad, se llevaron a cabo pruebas de migración rápida de cloruro (RCM), resistividad eléctrica, penetración rápida de cloruro (RCP) y profundidad de penetración de agua.	Experimental	El estudio se limitó por el contenido de agregados que se utilizó por la magnitud y pureza para prolongar su calidad del concreto.	En conclusión, este estudio demostró que la incorporación de nanopartículas, especialmente el dióxido de titanio (nano-TiO2), mejoró significativamente las propiedades del concreto autocompactante (SCC). La adición de nano-TiO2 aumentó la resistencia a la compresión del SCC y mejoró su trabajabilidad. Además, se encontró que el contenido de nano-TiO2 afectó significativamente las propiedades del SCC, y que una dosis del 5% en peso de cemento fue la más efectiva para mejorar la durabilidad del SCC. Estos resultados sugieren que la incorporación de nano-TiO2 puede ser una estrategia efectiva para mejorar las propiedades del SCC.	La alta superficie de las nanopartículas proporcionó sitios de nucleación para las partículas de cemento y aceleró el desarrollo del proceso de hidratación. La formación de un mayor contenido de productos de hidratación ayudó a la densificación de la microestructura.	La relevancia del artículo en su estudio es la realización de una fusión de nano partículas que en conjunto realizan la mejor del elemento en cuestion de calidad.	2020
19	Pore characteristics of different phase in nano-modified concrete and their influences on the compressive strength	Características de los poros de diferentes fases en hormigón nanomodificado y sus influencias en la resistencia a la compresión	Jingge Ren, Xiaoxiao Luo, Ruiqiang Bai, Chonggen Pan, Jun Zhang	Comprender integralmente la influencia de las nanopartículas en las características de los poros del hormigón; Se utilizaron saturación de vacío, porosimetría de intrusión de mercurio y microscopía electrónica de barrido para analizar las características de los poros del bloque de concreto, la fase de mortero y la fase ITZ, respectivamente.	as nanopartículas también pueden disminuir la apertura de poro más probable y la apertura crítica en la fase de mortero, y pueden disminuir el número de poros en la fase ITZ. Posteriormente, se analizó mediante la teoría gris la influencia de estas porosidades sobre la resistencia a la compresión.	Experimental	Los grados de correlación entre las porosidades y la resistencia a la compresión indicaron que la porosidad de la fase de mortero fue una buena opción para estimar la resistencia a la compresión.	El estudio concluye que el uso de nanopartículas de dióxido de titanio (TiO2) puede mejorar significativamente las características de porosidad del concreto y, por lo tanto, mejorar su resistencia a la compresión. Los resultados indican que la reducción de la porosidad del concreto mediante el uso de nanopartículas de TiO2 es la forma más efectiva de mejorar su resistencia a la compresión. Además, se encontró que la porosidad de la fase del mortero es una buena opción para estimar la resistencia a la compresión del concreto.	Los estudios fueron significativos y útiles para investigar las propiedades del hormigón mediante nanopartículas.	Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión indicaron que al reducir las porosidades, nano-SiO 2 y nano-TiO 2 pueden mejorar la resistencia a la compresión en un 15.79% y 9.22%, respectivamente.	2022
20	Exploring the influence of SiO2 and TiO2 nanoparticles on the mechanical properties of concrete	Explorando la influencia de las nanopartículas de SiO2 y TiO2 en las propiedades mecánicas del hormigón.	Jingge Ren, Yuanming Lai, Jianqiang Gao	El uso de nanomateriales para mejorar el hormigón ha recibido amplia atención. Al agregar nanopartículas, la cantidad de poros dañinos en el concreto disminuye y la estructura del concreto se vuelve más densa.	Algunas nanopartículas pueden incluso reaccionar con productos hidratados, producir material en gel y, por tanto, mejorar significativamente el rendimiento del hormigón.	Experimental	Dado que la propiedad mecánica es un indicador clave para evaluar el hormigón añadido con diferentes nanoaditivos, es significativo investigar no sólo las funciones de las nanopartículas sino también las propiedades mecánicas del hormigón modificado.	Tanto NS como NT, con un contenido en masa del 3%, pueden mejorar al máximo la resistencia a la compresión del hormigón en un 16% y un 9%, respectivamente. NS puede mejorar la resistencia temprana del concreto, mientras que NT tiene un efecto negativo sobre la resistencia temprana del concreto.	La resistencia a la compresión de cada proporción de la mezcla se probó a diferentes edades para registrar la evolución de la resistencia. Las resistencias a la compresión de OPC, NS1, NS3, NSS y NST1.5 a los 3, 7, 21 y 28 días	Indica que las resistencias a la compresión del hormigón mejoran añadiendo NS. Las muestras con NS tienen mayores resistencias a la compresión que aquellas con OPC a los 3 y 7 días.	2018

Nota. Elaboración propia

#	TÍTULO	ESPAÑOL	AUTOR	IDEAS PRINCIPALES	SUBTEMAS (indicadores)	MÉTODO	LIMITACIONES	CONCLUSIONES	RECOMENDACIONES	RELEVANCIA	AÑO
21	Effects of pozzolanic and non-pozzolanic nanomaterials on cement-based materials	Efectos de los nanomateriales pozzolánicos y no pozzolánicos en materiales a base de cemento.	Huigang Xiao, Fengling Zhang, Rui Liu, Rongling Zhang, Zhiguo Liu, Hongxia Liu	Para la resistencia a la compresión de edad tardía, el pequeño contenido de nano-TiO2 muestra un efecto de mejora obviamente similar al del gran contenido de nano-TiO2.	El análisis de la estructura de los poros muestra que tanto el nano-SiO2 como el nano-TiO2 pueden reducir la porosidad total de la pasta de cemento, pero el nano-TiO2 es más eficaz que el nano-SiO2 para reducir los poros diminutos.	Experimental	Los resultados de este artículo muestran que el nano-SiO2 y el nano-TiO2 tienen efectos diferentes y deben seleccionarse en función de los requisitos de propiedades de los materiales a base de cemento.	Nano-SiO2 y nano-TiO2 pueden mejorar notablemente la resistencia a la compresión de la pasta de cemento a edades tempranas y avanzadas. Al ser un material pozzolánico, el nano-SiO2 es más eficiente que el nano-TiO2 para mejorar la resistencia a la compresión en edades tempranas. La eficiencia del nano-SiO2 depende en gran medida del tamaño y contenido del nano-SiO2.	La eficiencia del nano-SiO2 depende en gran medida del tamaño y contenido del nano-SiO2. Se prefieren el tamaño pequeño y el alto contenido de nano-SiO2 para mejorar la resistencia a la compresión de la pasta de cemento, especialmente a una edad temprana	Proporcionar información sobre los diferentes efectos y mecanismos del nano-SiO2 y el nano-TiO2 sobre las propiedades de los materiales a base de cemento.	2019
22	Influence of fine additives and surfactants on the strength and permeability degree of concrete	Influencia de los aditivos finos y tensioactivos sobre la resistencia y el grado de permeabilidad del hormigón.	Oksana Shkromada, Andriy Paliy, Oksana Yurchenko, Nadiia Khorobot, Alina Pikhitrova, Ivan Vysochin, Ganna Fedorenko, Anatoly Paliy	La idea principal es que la adición de nanopartículas de dióxido de titanio y surfactantes al concreto puede mejorar su resistencia y reducir su permeabilidad. Estos aditivos aceleran la hidratación del concreto, aumentando su resistencia y disminuyendo la penetración de cloruros.	El subtema es el efecto de aditivos finos y surfactantes en la resistencia y permeabilidad del concreto. Efecto de la concentración de surfactantes en la densidad de compresión del concreto	Experimental	Sin embargo, se debe tener cuidado con el uso excesivo de nanopartículas de dióxido de titanio, ya que puede disminuir la resistencia del concreto.	La principal conclusión de la investigación es que la adición de nanopartículas de dióxido de titanio y tensioactivos al hormigón puede mejorar su resistencia a la compresión y reducir su permeabilidad. El uso de estos aditivos acelera el proceso de hidratación y conduce a una estructura de hormigón más densa.	Es importante controlar cuidadosamente la concentración de aditivos, como nanopartículas de dióxido de titanio y tensioactivos, al añadirlos al hormigón. Cantidades excesivas de estos aditivos pueden disminuir la resistencia del hormigón.	La relevancia de este estudio radica en su contribución al desarrollo de técnicas y aditivos que pueden mejorar las propiedades del concreto, significativamente en la resistencia y permeabilidad del concreto, lo que puede conducir a estructuras más duraderas y seguras.	2020
23	Effect of nano TiO2 on mechanical properties and microstructure of concrete	Efecto del nano TiO2 sobre las propiedades mecánicas y la microestructura del hormigón.	Sudhanshu S. Pathak, Gaurang R. Vesmawala	La idea principal es que la adición de nano dióxido de titanio (NT) puede mejorar las propiedades mecánicas del concreto, especialmente la resistencia a la compresión, pero no tiene un efecto significativo en la resistencia a la flexión. Además, el uso de NT resulta en una microestructura más densa del concreto. Sin embargo, se necesita más investigación para determinar las proporciones óptimas de la mezcla y obtener mejores resultados.	Uso de nano dióxido de titanio (NT) en el concreto, efecto del NT en las propiedades mecánicas del concreto, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y microestructura del concreto con NT.	Experimental	Las limitaciones de este estudio incluyen la falta de análisis de otras propiedades del concreto, la falta de optimización de las proporciones de la mezcla y la falta de investigación sobre el efecto a largo plazo del NT en el concreto.	Las conclusiones que favorecen a esta investigación son las siguientes: la adición de nano dióxido de titanio mejora la resistencia a la compresión del concreto, la microestructura del concreto se ve mejorada con el uso de nano dióxido de titanio, y la adición de ceniza volante junto con nano dióxido de titanio puede mejorar la resistencia a la tracción.	Las recomendaciones que favorecen a esta investigación son las siguientes: se recomienda realizar más investigaciones para optimizar las proporciones de la mezcla y obtener mejores resultados con la adición de nano dióxido de titanio. También se sugiere investigar el efecto a largo plazo del NT en el concreto	La relevancia de esta investigación radica en que demuestra que la adición de nano dióxido de titanio puede mejorar las propiedades mecánicas del concreto, lo cual puede tener aplicaciones en la construcción de estructuras más resistentes y duraderas.	2013
24	Hybrid effect of nano-alumina and nano-titanium dioxide on Mechanical properties of concrete	Efecto híbrido de nanoalúmina y nanodióxido de titanio sobre las propiedades mecánicas del hormigón.	Muhammad Atiq Orakzai	La adición de nano-alúmina y nano-dióxido de titanio mejora las propiedades mecánicas del concreto, como la resistencia a la compresión, tensión y flexión, al crear una microestructura compacta y densa con menos poros.	La adición de nano-alúmina y nano-dióxido de titanio mejora las propiedades mecánicas del concreto, como la resistencia a la compresión, tensión y flexión, al crear una microestructura compacta y densa con menos poros.	Experimental	Las restricciones de esta investigación incluyen la falta de pruebas a largo plazo y la necesidad de evaluar el desempeño en condiciones ambientales y de carga real	La adición de nano-alúmina y nano-dióxido de titanio mejora significativamente las propiedades mecánicas del concreto, como la resistencia a la compresión, tensión y flexión, al crear una microestructura compacta y densa con menos poros.	La recomendación basada en esta investigación es utilizar la combinación de nano-alúmina y nano-dióxido de titanio en el concreto para mejorar sus propiedades mecánicas, como la resistencia a la compresión, tensión y flexión.	La relevancia de esta investigación radica en que demuestra que la adición de nano-alúmina y nano-dióxido de titanio mejora significativamente las propiedades mecánicas del concreto, lo que puede tener un impacto positivo en la construcción de estructuras más fuertes y duraderas.	2021
25	Mechanical and Durability Characteristics of TiO2 and Al2O3 Nanoparticles with Sisal Fibers	Características mecánicas y de durabilidad de nanopartículas de TiO2 y Al2O3 con fibras de sisal	R. Rajkumar, R. Nirmala, V. Vivekananthan	La adición de nanopartículas y fibras de sisal mejora las propiedades mecánicas y durabilidad del concreto, mostrando una mayor resistencia y menor absorción de agua. Estos resultados demuestran los beneficios potenciales de utilizar nanopartículas y fibras en la producción de concreto.	Mejora de propiedades mecánicas y durabilidad del concreto. Variación en la absorción de agua y sorptividad según la composición del concreto. Influencia de la cantidad de nanopartículas y fibras en la resistencia del concreto. Importancia de la proporción óptima de nanopartículas y fibras en el concreto. Mejora de la trabajabilidad del concreto con la adición de fibras y nanopartículas.	Experimental	Las limitaciones de esta investigación incluyen la falta de pruebas a largo plazo, la falta de consideración de otros aditivos y la falta de análisis económico	La conclusión de esta investigación es que la adición de nanopartículas y fibras de sisal mejora las propiedades mecánicas y durabilidad del concreto. Sin embargo, se requieren pruebas a largo plazo y considerar otros aditivos para una validación más completa.	La recomendación de esta investigación es que se realicen pruebas a largo plazo y se consideren otros aditivos para validar y mejorar aún más los resultados obtenidos. Además, se sugiere realizar un análisis económico para evaluar la viabilidad de utilizar nanopartículas y fibras en la producción de concreto	La relevancia de esta investigación radica en su contribución al desarrollo de concreto más resistente y duradero mediante la incorporación de nanopartículas y fibras de sisal. Estos avances pueden tener un impacto significativo en la industria de la construcción y en la reducción del impacto ambiental.	2022
26	Strengths and durability performances of blended cement concrete with TiO2 nanoparticles and rice husk ash	Resistencia y durabilidad del hormigón de cemento mezclado con nanopartículas de TiO2 y ceniza de cáscara de arroz.	T.R. Praveenkumar, M.M. Vijayalakshmi, M.S. Meddah	La idea principal es que la combinación de nanopartículas de TiO2 y ceniza de cáscara de arroz (RHA) mejora la resistencia y durabilidad del concreto, reduciendo el consumo de clínker y las emisiones de CO2 en su producción. Además, esta combinación también mejora las propiedades mecánicas y la resistencia del concreto a la penetración de cloruro y al ataque ácido.	Es el efecto de la adición de nanopartículas de TiO2 y ceniza de cáscara de arroz (RHA) en las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto, incluyendo la resistencia a la penetración de cloruro y la resistencia al ataque químico. También se menciona la evaluación de estándares y métodos de prueba para medir estas propiedades.	Experimental	Las limitaciones de esta investigación incluyen la falta de pruebas a largo plazo y la falta de consideración de otros factores ambientales y de mezcla	En conclusión los hallazgos principales de este estudio, se puede concluir que la adición de nanopartículas de TiO2 y ceniza de cáscara de arroz (RHA) mejora la resistencia y durabilidad del concreto. Estos materiales pueden reducir el consumo de clínker y las emisiones de CO2 en la producción de concreto, además de mejorar las propiedades mecánicas y la resistencia a la penetración de cloruro y al ataque ácido.	Según los resultados de esta investigación, se recomienda considerar la adición de nanopartículas de TiO2 y ceniza de cáscara de arroz (RHA) en la producción de concreto para mejorar su resistencia y durabilidad. Además, se sugiere realizar pruebas a largo plazo y considerar otros factores ambientales y de mezcla para una evaluación más completa	La relevancia de esta investigación radica en su contribución al desarrollo de materiales de construcción más sostenibles y duraderos. La adición de nanopartículas de TiO2 y ceniza de cáscara de arroz (RHA) en el concreto puede reducir el consumo de clínker y las emisiones de CO2, al tiempo que mejora sus propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión.	2019
27	Influence of ZnO and TiO2 on mechanical and durability properties of concrete prepared with and without polypropylene fibers	Influencia del ZnO y TiO2 en las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón preparado con y sin fibras de polipropileno.	T.V. Reshma, M. Manjunatha, A. Bharath, Ranjitha B. Tangadagi, Jagadish Vengala, LR Manjunatha	La idea principal de la investigación es que la adición de nanomateriales, como el zinc óxido (ZnO) y el dióxido de titanio (TiO2), junto con fibras de polipropileno, mejora las propiedades mecánicas y durabilidad del concreto. Los experimentos demostraron que la combinación de 4% de ZnO y 2% de TiO2 como reemplazo parcial del cemento resultó en la mayor mejora de las propiedades del concreto.	Es el efecto de los nanomateriales y las fibras de polipropileno en las propiedades mecánicas, durabilidad y absorción de agua del concreto. Los experimentos evaluaron la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia a la tracción, absorción de agua, sorptividad y ataque químico del concreto con diferentes porcentajes de nanomateriales y fibras de polipropileno.	Experimental	Las limitaciones de esta investigación incluyen la falta de consideración de otros factores ambientales que podrían afectar las propiedades del concreto.	En conclusión, la investigación demostró que la adición de nanomateriales, como el zinc óxido y el dióxido de titanio, junto con fibras de polipropileno, mejora las propiedades mecánicas y durabilidad del concreto. Estos resultados sugieren que el uso de nanomateriales y fibras puede ser beneficioso para mejorar la calidad y rendimiento del concreto.	Como recomendación, se sugiere utilizar una combinación de 4% de zinc óxido (ZnO) y 2% de dióxido de titanio (TiO2) como reemplazo parcial del cemento en la mezcla de concreto. Además, se recomienda incorporar fibras de polipropileno para mejorar aún más las propiedades del concreto.	La relevancia de esta investigación radica en que demuestra que la adición de nanomateriales y fibras de polipropileno puede mejorar significativamente las propiedades mecánicas y durabilidad del concreto. E	2021

Nota. Elaboración propia

### Anexo C: Relación entre subtemas y objetivos

SUBTEMAS (Indicadores)	Definición / Justificación del subtema/ delimitación temporal (si aplica)	Objetivo
<b>Poros capilares</b>	Los poros capilares son pequeños vacíos que se forman en el concreto durante el fraguado y curado, a menudo afecta a la resistencia del concreto, ya que es responsable de la permeabilidad del material. La relación agua/cemento y la calidad de los agregados utilizados en la mezcla son los principales factores que influyen en la porosidad del concreto.	Determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio para reducir los poros capilares del concreto fotocatalítico.
<b>Iones de cloruro</b>	La absorción de iones de cloruro en el concreto se refiere a la capacidad del concreto para absorber y transportar estos iones. Esta absorción, junto con la difusión, puede llevar a los iones de cloruro y otras sustancias al interior del concreto, lo que puede dañarlo y reducir su vida útil. Por lo tanto, es un factor importante en la durabilidad del concreto.	Determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio para incrementar la resistencia a los iones de cloruros del concreto fotocatalítico.
<b>Resistencia a la compresión</b>	La resistencia a la compresión es la capacidad del concreto para soportar cargas sin fracturarse, medida en megapascales (MPa) o libras por pulgada cuadrada (psi). Esta resistencia es crucial para la durabilidad del concreto, ya que un concreto con alta resistencia a la compresión tiende a tener una mayor vida útil y es menos susceptible a daños estructurales	Determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio para incrementar la resistencia a la compresión del concreto fotocatalítico.
<b>Resistencia a la flexión</b>	La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción del concreto. Es la capacidad del concreto para resistir la falla por momento en una viga o losa de concreto no reforzada. Esta resistencia es esencial para la durabilidad del concreto, ya que un concreto con alta resistencia a la flexión tiende a tener una mayor vida útil y es menos susceptible a daños estructurales	Determinar el porcentaje de nanomateriales de dióxido de titanio para incrementar la resistencia a la flexión del concreto fotocatalítico.

*Nota.* Elaboración propia

## Anexo D: Matriz de Relación entre subtemas y las referencias bibliográficas

Fuente	Autor(es)	Título	SUBTEMAS (Indicadores) 1 Poros capilares	SUBTEMAS (Indicadores) 2 Iones de cloruro	SUBTEMAS (Indicadores) 3 Resistencia a la compresión	SUBTEMAS (Indicadores) 4 Resistencia a la flexión
1	Garima Rawat, Sumit Gandhi, Yogesh Iyer Murthy	A critical assessment on the effect of nano-titanium dioxide on the properties of concrete	La adición de nano-titanio en el concreto reduce los poros capilares, la porosidad y la absorción de agua, mejorando la durabilidad y la resistencia del material.	Los iones de cloruro afectan la durabilidad del concreto, aumentando la corrosión de las barras de refuerzo. La adición de nano-titanio puede reducir la penetración de los iones de cloruro.	La adición de nano-titanio en el concreto mejora la resistencia a la compresión, con aumentos de hasta el 58.54% después de 28 días.	La adición de nano-titanio en el concreto mejora la resistencia a la flexión, con aumentos de hasta el 27.78% después de 28 días.
2	Mao-hua Zhang, Hui Li	Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement	El estudio encontró que la adición de nanopartículas reduce la porosidad y la absorción de agua en el concreto, con una disminución del 25% en la porosidad y una reducción del 20% en la absorción de agua.	El estudio encontró que la adición de nanopartículas mejora la resistencia a la penetración de cloruro en el concreto, con un aumento del 31% en la resistencia para el concreto con nano-TiO2.	El estudio encontró que la adición de nanopartículas aumenta la resistencia a la compresión del concreto, con mejoras de hasta un 20% en la resistencia.	El estudio encontró que la adición de nanopartículas y fibras de PP aumenta la resistencia a la flexión del concreto, con mejoras de hasta un 20% en la resistencia.
3	Ali Nazari, Shadi Riahi, Shirin Riahi, Seyedeh Fatemeh Shamekhi, A. Khademno	Assessment of the effects of the cement paste composite in presence TiO2 nanoparticles			El estudio encontró que la adición de nanopartículas de TiO2 al concreto aumentó su resistencia a la compresión. El porcentaje óptimo de reemplazo fue del 1.0%, con mejoras significativas en comparación con el concreto sin nanopartículas.	
4	Hui Li, Hui-gang Xiao, Xinchun Guan, Zetao Wang, Lei Yu	Chloride diffusion in concrete containing nano-TiO2 under coupled effect of scouring	El concreto con nanopartículas mostró una mejora del 25.9% en la absorción de agua en comparación con el concreto convencional.	El concreto con nanopartículas mostró una mejora del 17.6% en la absorción de cloruro en comparación con el concreto convencional.	El concreto con nanopartículas mostró un aumento del 36% en la resistencia a la compresión en comparación con el concreto convencional.	
5	Farzad Soleymani	Assessments of the effects of lime water on water permeability of TiO2 nanoparticles binary blended palm oil clinker aggregate-based concrete	El contenido óptimo de nanopartículas de TiO2 para reducir la absorción de agua en el concreto fue del 2.0%, lo que resultó en una disminución significativa de los poros capilares y la porosidad			
6	Ali Nazari, Shadi Riahi, Shirin Riahi, Seyedeh Fatemeh Shamekhi, A. Khademno	Improvement the mechanical properties of the cementitious composite by using TiO2 nanoparticles				El estudio concluye que la resistencia a la flexión mejora con la adición de nanopartículas de TiO2, alcanzando su máximo reemplazando el 1% del cemento. No se mencionan porcentajes de mejora específicos.
7	Garima Rawat, Sumit Gandhi, Yogesh Iyer Murthy	Durability Aspects of Concrete Containing Nano-Titanium Dioxide	Los resultados mostraron que la adición de nanopartículas de TiO2 redujo la absorción de agua y la porosidad aparente en el concreto, mejorando así su resistencia a la permeabilidad del agua.	Los resultados mostraron que la adición de nanopartículas de TiO2 redujo la penetración de iones de cloruro en el concreto, mejorando su resistencia a la corrosión.	Los resultados mostraron que la adición de nanopartículas de TiO2 mejoró la resistencia a la compresión del concreto, con un aumento máximo del 18.67% a un nivel de reemplazo del 1.5%.	La adición de nanopartículas de TiO2 mejoró la resistencia a la flexión del concreto, alcanzando un valor máximo a un nivel de reemplazo del 1.5%.
8	Zhen Li, Siqi Dingh, Xun Yuc, Baoguo Hana, Jinping Oua	Multifunctional cementitious composites modified with nano titanium dioxide: A review	Revisión: Las nanopartículas mejoran la porosidad y absorción de agua en los compuestos cementicios, con un porcentaje óptimo de nanopartículas del 2%	Revisión: Las nanopartículas reducen la penetración de iones de cloruro en los compuestos cementicios, con un porcentaje óptimo de nanopartículas del 3%.	Revisión: Las nanopartículas mejora la resistencia a la compresión en los compuestos cementicios, con un porcentaje óptimo de nanopartículas del 1%.	Revisión: Las nanopartículas mejora la resistencia a la flexión en los compuestos cementicios, con un porcentaje óptimo de nanopartículas del 1%.
9	Abdul Rahim & Sandanu. R.Nair	Influence of Nano-Materials in High Strength Concrete			El contenido óptimo de nanopartículas fue del 4%, logrando incrementar la resistencia a la compresión en un 34%.	El contenido óptimo de nanopartículas fue del 4%, logrando incrementar la resistencia a la compresión en un 40%.

Nota. Elaboración propia

Fuente	Autor(es)	Título	SUBTEMAS (Indicadores) 1 Poros capilares	SUBTEMAS (Indicadores) 2 Iones de cloruro	SUBTEMAS (Indicadores) 3 Resistencia a la compresión	SUBTEMAS (Indicadores) 4 Resistencia a la flexión
10	Ali Nazari, Shadi Riahi	The effect of TiO <sub>2</sub> nanoparticles on water permeability and thermal and mechanical properties of high strength self-compacting concrete	El contenido óptimo de nanopartículas de TiO <sub>2</sub> en el concreto fue del 4% en peso, lo que resultó en una mejora significativa en la estructura de porosidad y una reducción en la absorción de agua.		El contenido óptimo de nanopartículas de TiO <sub>2</sub> en el concreto fue del 4% en peso, lo que resultó en una mejora significativa en la resistencia a la compresión.	El contenido óptimo de nanopartículas de TiO <sub>2</sub> en el concreto fue del 4% en peso, lo que resultó en una mejora significativa en la resistencia a la flexión.
11	Baoguo Ma, Hainan Li, Junpeng Mei, Xiangguo Li, and Fangjie Chen	Effects of Nano-TiO <sub>2</sub> on the Toughness and Durability of Cement-Based Material	El agregado de 3% de nanopartículas de TiO <sub>2</sub> reduce la porosidad y mejora la resistencia a la absorción de agua en morteros y concretos.		El contenido óptimo de nanopartículas de TiO <sub>2</sub> para mejorar la resistencia a la compresión en morteros y concretos es del 3%.	El contenido óptimo de nanopartículas de TiO <sub>2</sub> para mejorar la resistencia a la flexión en morteros es del 3%, con un aumento del 61.9% en comparación con los morteros sin nanopartículas.
12	Sumit Sharma, Inderpreet Kaur, Sushant Gupta	Effect of Fly Ash and Nano Titanium Dioxide on Compressive Strength of Concrete			Los resultados mostraron que la adición de 1.5% de nanopartículas de TiO <sub>2</sub> en el concreto resultó en la máxima resistencia a la compresión, con un aumento del 27.6% en comparación con el concreto sin aditivos.	
13	Caroline S. Sobhy, Taher A. Tawfik, G.M. Abd El Hafez, A. Serag Faried	Insights on the influence of nano-Titanium dioxide and nano-Zinc oxide on mechanical properties and inhibiting of steel reinforcement	Los resultados mostraron que la adición de nanopartículas de TiO <sub>2</sub> y ZnO redujo la porosidad y la absorción de agua en el concreto, con un porcentaje óptimo de adición del 1.5%.		Los resultados mostraron que el porcentaje óptimo de nanopartículas de TiO <sub>2</sub> y ZnO fue del 1.5%, lo que resultó en mejoras de resistencia a la compresión de hasta un 36.57% a los 90 días.	Los resultados mostraron que el porcentaje óptimo de nanopartículas de TiO <sub>2</sub> fue del 1%, lo que resultó en una mejora de la resistencia a la flexión de aproximadamente un 26.83%.
14	Hamidreza Esmaeili, Alireza Hajiani Bousbehrian	Effect of Nano Titanium Dioxide on the Permeability and Compression Strength of Concrete	El uso de nanopartículas de dióxido de titanio en el hormigón reduce la permeabilidad y la absorción de agua, con un porcentaje óptimo de 4%.		El uso de nanopartículas de dióxido de titanio en el hormigón mejora la resistencia a la compresión, con un porcentaje óptimo de 4%.	
15	Dr.R.Umamaheswari, S.Monisha	Experimental investigation of concrete using titanium dioxide			El estudio concluye que la adición de 1.5% de TiO <sub>2</sub> en el cemento mejora significativamente la resistencia a la compresión del concreto.	El estudio concluye que la adición de 1.5% de TiO <sub>2</sub> en el cemento mejora significativamente la resistencia a la flexión del concreto.
16	Sujay Raghavendra Naganna, K Jayakesh, V R Anand	Nano-TiO <sub>2</sub> particles: a photocatalytic admixture to amp up the performance efficiency of cementitious composites	Los resultados muestran que la incorporación de nanopartículas de TiO <sub>2</sub> en el cemento reduce la porosidad y la absorción de agua, con un porcentaje óptimo de nanopartículas del 4%.		La resistencia a la compresión de las muestras de mortero y concreto mejoró con la adición de nanopartículas de TiO <sub>2</sub> , con un porcentaje óptimo de nanopartículas del 6%.	
17	S.D. Anitha Selvasofia, E. Sarojini, G. Moulica, Sajin Thomas, M. Tharani, P.T. Saravanakumar, P. Manoj Kumar	Study on the mechanical properties of the nanoconcrete using nano-TiO <sub>2</sub> and nanoclay			El estudio concluyó que la adición de 2.0% de nano-TiO <sub>2</sub> en el concreto resultó en la máxima resistencia a la compresión, independientemente del período de curado.	El estudio concluyó que la adición de 2.0% de nano-TiO <sub>2</sub> y 3.0% de nanoclay en el concreto resultó en la máxima resistencia a la flexión durante todos los ciclos de curado.
18	Alireza Jashaghani, Mohammad Balapour, Mohammad Mashhadian, Togay Ozbakkaloglu	Effects of nano-TiO <sub>2</sub> , nano-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , and nano-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> on rheology, mechanical and durability properties of self-consolidating concrete (SCC): An experimental study	Debido a su gran área superficial, el nano-TiO <sub>2</sub> puede promover el proceso de hidratación y reducir la porosidad, lo que en consecuencia conduce a una menor profundidad de penetración del agua en las mezclas.	Los resultados RCPY y RCMT confirman la reducción de la penetración de iones de cloruro con la adición de nano-TiO <sub>2</sub> .	El nano-TiO <sub>2</sub> ayuda a la formación homogénea de CSH, el cual aumenta la resistencia a la compresión de las muestras.	

*Nota.* Elaboración propia

Fuente	Autor(es)	Título	SUBTEMAS (Indicadores) 1 Poros capilares	SUBTEMAS (Indicadores) 2 Iones de cloruro	SUBTEMAS (Indicadores) 3 Resistencia a la compresión	SUBTEMAS (Indicadores) 4 Resistencia a la flexión
19	Jingge Ren, Xiaoxiao Luo, Ruiqiang Bai, Chonggen Pan, Jun Zhang	Pore characteristics of different phase in nano-modified concrete and their influences on the compressive strength	los resultados indicaron que con las mejores dosificaciones de nano-TiO2 se puede reducir la porosidad del concreto en un 3.5%.		Al reducir la porosidad se aprecia que la resistencia a la compresión mejora en un 9.22%.	
20	Jingge Ren, Yuanming Lai, Jianqiang Gao	Exploring the influence of SiO2 and TiO2 nanoparticles on the mechanical properties of concrete			El nano-TiO2 con un contenido máximo del 3% puede mejorar la resistencia a la compresión hasta en un 9%.	
21	Huigang Xiao, Fengling Zhang, Rui Liu, Rongling Zhang, Zhiguo Liu, Hongxia Liu	Effects of pozzolanic and non-pozzolanic nanomaterials on cement-based materials	La porosidad de la pasta de cemento que contiene nano-SiO2 y nano-TiO2 disminuye con respecto a la muestra de referencia, y la porosidad de la pasta de cemento que contiene nanomateriales determina la resistencia a la compresión.		Nano-TiO2 mejora notablemente la resistencia a la compresión del mortero a edades tempranas y tardías. Al ser material puzolánico, el nano-SiO2 es más eficiente que el nano-TiO2 para mejorar la resistencia a la compresión en edades tempranas.	
22	Oksana Shkromada, Andriy Paliy, Oksana Yurchenko, Nadiia Khobot, Alina Pikhitrova, Ivan Vysochin, Ganna Fedorenko, Anatoliy Paliy	Influence of fine additives and surfactants on the strength and permeability degree of concrete	La adición de dióxido de titanio (nanoTiO2), dióxido de titanio cristalino anatasa finamente dispersado (anatazTiO2) y tensioactivos reduce la permeabilidad de las muestras de hormigón a los iones de cloro hasta en un 10 %.		Como resultado de los estudios, se demuestra experimentalmente que la resistencia a la compresión del hormigón aumenta con la adición de nanopartículas de dióxido de titanio (nanoTiO2) en un 23.2 % a una concentración del 5 % en peso.	
23	Sudhanshu S. Pathak, Gaurang R. Vesmawala	Effect of nano TiO2 on mechanical properties and microstructure of concrete			NT con 4% junto con FA20 (NT4FA20) mostró una mejora en la resistencia a la compresión a los 28 días, la mejora de los resultados mostró una mejora del 3,82% en los resultados en comparación con el hormigón de control.	En cuanto a la resistencia a la flexión, no se observó ninguna mejora en las mezclas que utilizan NT, mientras que NT4FA20 parece tener la mayor resistencia a la flexión en comparación con otras mezclas NT.
24	Muhammad Atiq Orakzai	Hybrid effect of nano-alumina and nano-titanium dioxide on Mechanical properties of concrete	El autor percibió que la combinación binaria de nano-AIO y nano-TiO mejora la estructura de los poros, lo que da como resultado propiedades mecánicas altamente optimizadas.		En comparación con la muestra de control, la resistencia a la compresión aumentó un 42 %.	En comparación con la muestra de control, la resistencia a la flexión aumentó un 28 %.
25	R. Rajkumar, R. Nirmala, V. Vivekananthan	Mechanical and Durability Characteristics of TiO2 and Al2O3 Nanoparticles with Sisal Fibers	El uso de nanopartículas y fibras en el concreto reduce la susceptibilidad del material al ataque químico y la absorción de agua, según una investigación.		Según los resultados de las pruebas de propiedades mecánicas, se encuentra que el uso óptimo de TiO2 y Al2O3 es del 4% y del 4% con fibras.	
26	T.R. Praveenkumar, M.M. Vijayalakshmi, M.S. Meddah	Strengths and durability performances of blended cement concrete with TiO2 nanoparticles and rice husk ash		La reducción en la carga total pasada para mezclas de concreto curadas en húmedo hasta 28 días oscila entre 20% y 35.5% al aumentar el contenido de Nanopartículas de TiO2 en la mezcla de 1% a 5%.	Una adición de una cantidad moderada de nanopartículas de TiO2 que oscila entre el 2 y el 3% parece ser la cantidad óptima que conduce a una mejora de las propiedades mecánicas del hormigón.	De manera similar a la resistencia a la compresión, parece que hasta un nivel de reemplazo del 3% de nano-TiO2 conduce al valor más alto de resistencia a la flexión.
27	T V Reshmaa, M Manjunatha, A Bharath, Ranjitha B Tangadagi, Jagadish Vengala, LR Manjunatha	Influence of ZnO and TiO2 on mechanical and durability properties of concrete prepared with and without polypropylene fibers	La máxima resistencia a la absorción de agua se encuentra incorporando PPF con 5% ZnO y 2.5% TiO2. La textura sólida del hormigón mejora la resistencia al paso del tiempo y aumenta la resistividad a la absorción.	El concreto mezclado con nanomateriales resiste bien el ataque químico. La variación gráfica da una clara evidencia de resistencia al ataque de cloruros.	La máxima resistencia se obtiene en la composición Mix-4 del hormigón en todas las edades donde se reemplaza el 4% de ZnO y el 2% de TiO2. Se observa una mejora similar de la resistencia en el hormigón con nanomateriales híbridos fibrosos.	La máxima resistencia se obtiene en la composición Mix-4 del hormigón en todas las edades donde se reemplaza el 4% de ZnO y el 2% de TiO2. Se observa una mejora similar de la resistencia en el hormigón de nanomateriales mixtos fibrosos.

Nota. Elaboración propia