

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DEL PERÚ**

**Escuela de Posgrado**



Desarrollo de recubrimiento para superficies exteriores en base a cemento modificado con  $\text{TiO}_2$  de propiedades fotocatalíticas y autolimpiantes

Tesis para obtener el grado académico de Maestra en Química que presenta:

*Deborah Gonzales Villacorta*

**Asesor:**

*Dr. Bruno Bertolotti Rivera*

Lima, 2025

## Informe de Similitud


Yo, Bruno Jesus Bertolotti Rivera, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada Desarrollo de recubrimiento para superficies exteriores en base a cemento modificado con  $TiO_2$  de propiedades fotocatalíticas y autolimpiantes, de la autora Deborah Gonzales Villacorta, de constancia de lo siguiente:

El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 15 %. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 26/06/2025. He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.

Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Lima, 27/06/2025

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Bertolotti Rivera, Bruno Jesus</u>	
DNI: 40964655	Firma 
ORCID: 0000-0003-3881-5697	

*A mi nona y a mi nono.*



## AGRADECIMIENTOS

A mi mami, Frankie y Barbie, muchas gracias por todo su cariño y por los consejos y enseñanzas que me han brindado. A Carlos Andrés, por todo el cariño y apoyo constante durante la preparación de este trabajo, por siempre darme palabras de aliento y ser mi aliado en todo momento y circunstancia.

Al Dr. Bruno Bertolotti, mi asesor de tesis, por sus consejos, acompañamiento y revisión de este trabajo, además de permitirme realizar la parte experimental de esta tesis en las instalaciones a cargo de su área en la empresa COMACSA mediante el uso de materiales y equipos para la caracterización. Siempre pudo darse un espacio de tiempo, a pesar de las demás responsabilidades laborales y proyectos en los que se encontraba, muchas gracias por la dedicación.

A mi compañera del equipo de I+D, la licenciada Erika Vilchez, por todo el soporte brindado y compañía durante el desarrollo de la parte experimental de este trabajo, por todos los buenos momentos durante mi estadía en la empresa.

Agradezco a la Dirección de Administración y Finanzas de la PUCP y al Departamento del Profesorado por el apoyo brindado para poder cursar y culminar mi Maestría.

A la Sección Química por abrir sus puertas y permitirme el acceso a sus instalaciones y equipos que permitieron el desarrollo exitoso de este trabajo de investigación. A mis profesores de la Sección, quienes me ayudaron a resolver dudas que surgieron durante la elaboración de este trabajo. A la Dra. Betty Galarreta por su apoyo en el empleo del equipo de microscopía SEM en la sección Química. También agradezco al Dr. Andrés Guerra y al Mg. Alvaro Tejada, quienes me apoyaron con el proceso de análisis de muestras por microscopía SEM en las instalaciones del Centro de Análisis de Materiales (CAM-PUCP).

## RESUMEN

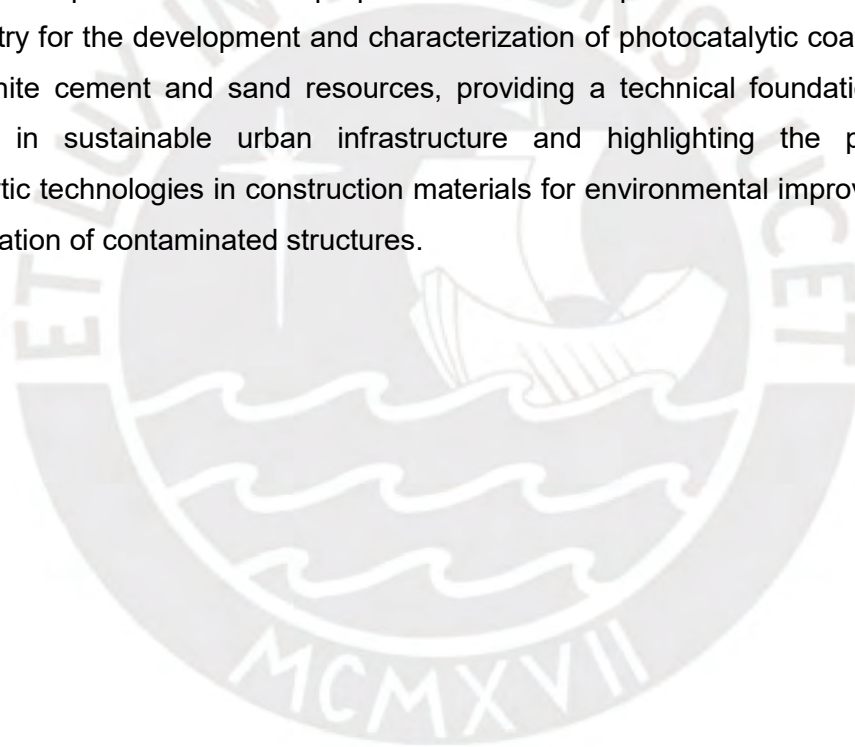
El siguiente trabajo tiene por objetivo el desarrollo de recubrimientos para superficies exteriores a partir de cemento modificado con dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), orientado a conferir propiedades fotocatalíticas y autolimpiantes al material. La investigación responde a la necesidad de implementar soluciones sostenibles para la mitigación de la contaminación ambiental, utilizando como base cemento blanco y arena de origen nacional.

La metodología experimental contempló la formulación de mezclas de mortero con diferentes porcentajes de adición de  $\text{TiO}_2$ , la caracterización de su fluidez y resistencia a la compresión conforme a normas internacionales, así como la evaluación de su eficiencia fotocatalítica a través de la prueba de la rodamina bajo exposición a radiación ultravioleta. Complementariamente, se realizaron análisis de microestructura mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y estudios de fases cristalinas mediante difracción de rayos X (XRD). Los resultados obtenidos evidenciaron que la incorporación de  $\text{TiO}_2$  confiere una actividad fotocatalítica significativa a los morteros desarrollados, manteniendo propiedades mecánicas aceptables.

Este trabajo constituye un aporte inicial en el contexto nacional al desarrollar y caracterizar un recubrimiento fotocatalítico a partir de materiales locales, proporcionando fundamentos técnicos para su implementación en infraestructura urbana sostenible. Asimismo, resalta el potencial del empleo de tecnologías fotocatalíticas en materiales de construcción para la mejora de la calidad ambiental y la preservación de edificaciones expuestas a entornos contaminados.

## ABSTRACT

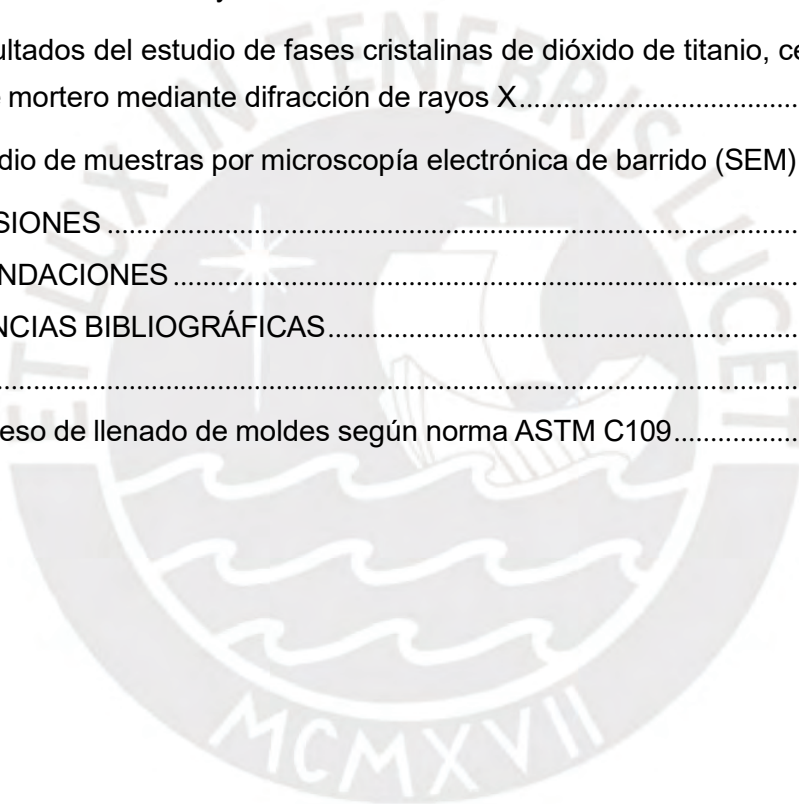
This study aims to develop exterior surface coatings based on cement modified with titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ), intended to confer photocatalytic and self-cleaning properties to the material. The research addresses the need for sustainable solutions to mitigate environmental pollution. The experimental methodology involved formulating mortar mixtures with different  $\text{TiO}_2$  contents, characterizing their workability and compressive strength according to international standards, and evaluating their photocatalytic efficiency through the rhodamine test (UNI 11259) under UV radiation. Complementary analyses included microstructural characterization using scanning electron microscopy (SEM) and crystalline phase identification by X-ray diffraction (XRD). The results demonstrated that the incorporation of  $\text{TiO}_2$  imparts significant photocatalytic activity to the mortars while maintaining acceptable mechanical properties. This work represents an initial contribution in the country for the development and characterization of photocatalytic coatings based on local white cement and sand resources, providing a technical foundation for their application in sustainable urban infrastructure and highlighting the potential of photocatalytic technologies in construction materials for environmental improvement and the preservation of contaminated structures.



## ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS .....	iv
RESUMEN .....	v
ABSTRACT .....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xii
1. ESTADO DEL ARTE.....	1
1.1. Problemas de contaminación de aire .....	1
1.2. Métodos actuales de remediación ambiental .....	2
1.3. Fotocatálisis como alternativa para remediar problemas de contaminación ambiental.....	3
1.4. Óxido de titanio y sus aplicaciones como agente de fotocatálisis.....	5
1.5. Materiales cementicios con titanio: propiedades mecánicas .....	9
1.6. Propiedades fotocatalíticas de materiales cementicios con titanio .....	10
2. JUSTIFICACIÓN .....	13
3. OBJETIVOS.....	15
4. METODOLOGÍA .....	16
4.1. Equipos y reactivos .....	16
4.1.1. Equipos.....	16
4.1.2. Reactivos y solventes.....	17
4.1.3. Materiales.....	17
4.1.4. Instrumentos y equipos.....	18
4.2. Metodología.....	18
4.2.1. Preparación de muestras de mortero de control para pruebas de resistencia a la compresión .....	19
4.2.2. Preparación de muestras de mortero modificado para pruebas de resistencia a la compresión .....	21
4.2.3. Estudio de resistencia a la compresión de las muestras de mortero.....	22
4.2.4. Estudio de fluidez de las mezclas de mortero desarrolladas .....	24

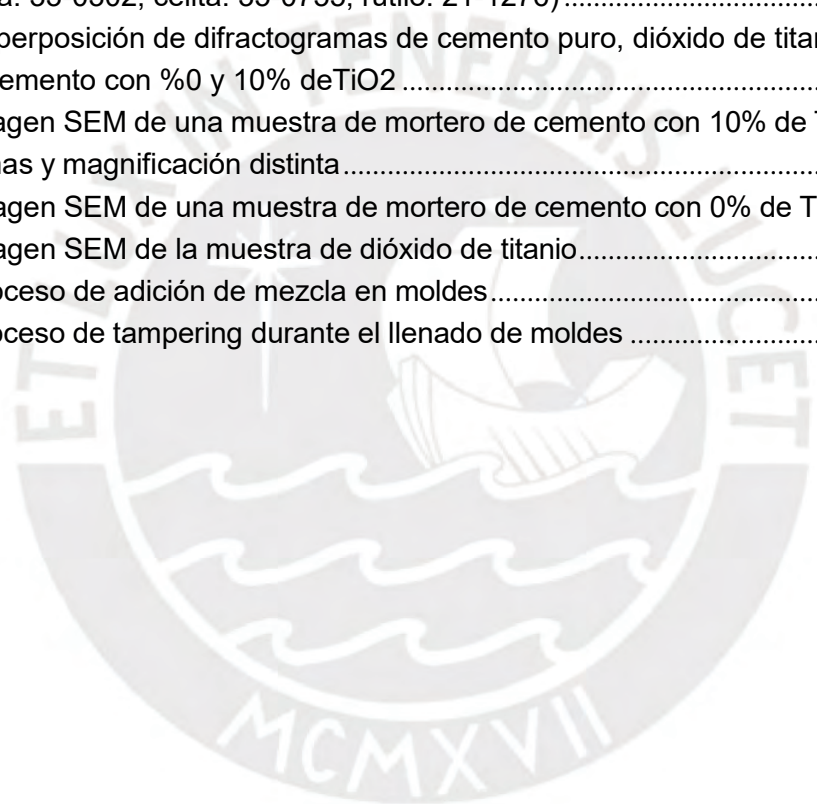
4.2.5.	Estudio de la actividad fotocatalítica de mezclas de mortero modificadas con dióxido de titanio.....	25
4.2.6.	Caracterización por difracción de rayos X (XRD) de dióxido de titanio .....	26
4.2.7.	Estudio de microestructuras de mezclas de mortero con dióxido de titanio por microscopía SEM .....	27
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	29
5.1.	Resultados de fluidez de las muestras de mortero .....	29
5.2.	Resistencia a la compresión de muestras de mortero .....	31
5.3.	Resultado del estudio de la actividad fotocatalítica y análisis colorimétrico de las muestras de mortero control y mortero modificado con dióxido de titanio .....	33
5.4.	Resultados del estudio de fases cristalinas de dióxido de titanio, cemento y muestras de mortero mediante difracción de rayos X.....	40
5.5.	Estudio de muestras por microscopía electrónica de barrido (SEM).....	53
6.	CONCLUSIONES .....	57
7.	RECOMENDACIONES .....	60
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
9.	ANEXOS .....	67
9.1.	Proceso de llenado de moldes según norma ASTM C109.....	67



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico de muertes según factores de riesgo (IHME, 2021) .....	1
Figura 2. Esquema de distribución de los contaminantes primarios y secundarios (Envira, 2022).....	3
Figura 3. Fases principales de la fotocatalisis con semiconductores (Binas et al., 2017) .....	5
Figura 4. Estructuras cristalinas de los polimorfos de TiO <sub>2</sub> : rutilo (tetragonal), brookita (ortorrómbica) y anatasa (tetragonal) (Haggerty et al., 2017).....	6
Figura 5. Edificaciones con recubrimientos cementicios modificados (A) Iglesia Dives in Misericordia en Italia (Konbr et al., 2022); (B) Salón de Música y Artes en Francia (Koli & Ke, 2022); (C) Sede principal de Air France en París (CMTP, 2024) .....	8
Figura 6. Esquema del mecanismo antibacteriano mediante fotocatalisis de dióxido de titanio (Javed et al., 2022).....	9
Figura 7. Proceso de preparación de cubos de mortero de cemento (Izquierda: mezcla en batidora, Centro: Cubos en moldes y en poza de curado, Derecha: Cubos finales).....	22
Figura 8. Prensa hidráulica utilizada para medir la resistencia a la compresión de las muestras de mortero .....	23
Figura 9. Pasos para realizar la prueba de medición de flujo del mortero de cemento (de izquierda a derecha).....	24
Figura 10. Preparación de cubos para prueba de actividad fotocatalítica .....	25
Figura 11. Proceso de medición colorimétrica de muestras de mortero (A: Medición en colorímetro Elrepho, B: ventana del programa DataColor Tools de recolección de datos colorimétricos) .....	26
Figura 12. Preparación de muestra de dióxido de titanio para análisis por difracción de rayos X .....	27
Figura 13. Preparación de muestras y análisis por microscopía SEM .....	27
Figura 14. Mesa de flujo y medida interna del molde para estudiar la trabajabilidad .....	29
Figura 15. Gráfica de resultados de fluidez de las muestras de mortero preparadas .....	30
Figura 16. Gráfico de resultados de resistencia a la compresión para muestras de mortero .....	33
Figura 17. Gráfica de resultados del parámetro "a" medido para las muestras de mortero preparadas .....	34
Figura 18. Muestras de mortero de cemento pintadas con rodamina y expuestas a luz UV según prueba UNI 11259.....	36
Figura 19. Programa de análisis colorimétrico ColorCalculator v7.77 (Osram, 2010).....	37
Figura 20. Esquema de elipses de MacAdam para grupos de medición (Sylvania, 2000).38	
Figura 21. Gráfica de color de las muestras de cubos de mortero pintados con rodamina a tiempo inicial .....	39
Figura 22. Comparación de variación de color para las muestras de mortero expuestas a diferentes tiempos de irradiación.....	40

Figura 23. Difractograma de rayos X de muestra de dióxido de titanio Kronos 2360.....	42
Figura 24. Difractograma de rayos X de la muestra en polvo de cemento puro .....	46
Figura 25. Difractograma de rayos X de la muestra de mortero de cemento puro .....	47
Figura 26. Difractograma de rayos X e índices de Miller de muestra de mortero de cemento sin dióxido de titanio (Código JCPDS de calcita. 05-0586, portlandita: 44-1481, alita: 49-0442, belita: 33-0302, celita: 35-0755) .....	49
Figura 27. Difractograma de rayos X de la muestra de mortero de cemento con 10% de TiO <sub>2</sub> (Código JCPDS de calcita. 05-0586, portlandita: 44-1481, alita: 49-0442, belita: 33-0302, celita: 35-0755, rutilo: 21-1276) .....	50
Figura 28. Difractograma de rayos X e índices de Miller de muestra de mortero de cemento con 10% de TiO <sub>2</sub> (Código JCPDS de calcita. 05-0586, portlandita: 44-1481, alita: 49-0442, belita: 33-0302, celita: 35-0755, rutilo: 21-1276) .....	52
Figura 29. Superposición de difractogramas de cemento puro, dióxido de titanio y morteros de cemento con %0 y 10% deTiO <sub>2</sub> .....	53
Figura 30. Imagen SEM de una muestra de mortero de cemento con 10% de TiO <sub>2</sub> en diferentes zonas y magnificación distinta .....	54
Figura 31. Imagen SEM de una muestra de mortero de cemento con 0% de TiO <sub>2</sub> .....	54
Figura 32. Imagen SEM de la muestra de dióxido de titanio.....	56
Figura 33. Proceso de adición de mezcla en moldes.....	67
Figura 34. Proceso de tampering durante el llenado de moldes .....	68



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cantidades de componentes para preparar 9 cubos de mortero de cemento.....	19
Tabla 2. Resultados del estudio de flujo de las muestras de mortero.....	29
Tabla 3. Resultados de resistencia a la compresión en kg/cm <sup>2</sup> y MPa para las muestras de mortero .....	32
Tabla 4. Resultados de actividad fotocatalítica de las muestras de mortero preparadas.....	34
Tabla 5. Relación de picos e índices de Miller obtenidos para la muestra de dióxido de titanio .....	41



## LISTA DE ABREVIATURAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (traducción: Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales)
C2S	Silicato dicálcico (C2S)
C3A	Aluminato tricálcico (C3A)
C3S	Silicato tricálcilo (C3S)
COMACSA	Compañía Minera de Agregados Calcáreos S.A.
IHME	<i>Institute For Health Metrics and Evaluation</i> (traducción: Instituto de Métricas y Evaluación de la Salud)
LED	<i>Light emitting diode</i> (traducción: Diodo emisor de luz)
LFD	<i>Large Field Detector</i> (traducción: Detector de campo grande)
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i> (traducción: Microscopio electrónico de barrido)
UNI	Ente Italiano di Normazione (Entidad italiana de normalización)
UV	Ultravioleta
VOC	Volatile Organic Compounds (compuestos orgánicos volátiles)
XRD	X-Ray Diffraction (difracción de rayos X)

# 1. ESTADO DEL ARTE

## 1.1. Problemas de contaminación de aire

En la actualidad, la polución del aire en espacios interiores y exteriores se ubica en el segundo lugar de principales causas de muerte a nivel mundial, y es generada por la presencia de una o más sustancias ajenas a la composición del aire, y en concentraciones que pueden tener un efecto nocivo en la salud de las personas. En la Figura 1 se presenta una gráfica con los factores de riesgo asociados con los niveles de mortalidad a nivel mundial (Binas et al., 2017; IHME, 2024).

Existen dos grupos de contaminantes: primarios y secundarios, los contaminantes primarios son gases de origen antropogénico generados en su mayoría por el parque automotor y sus emisiones de productos de combustión, así como también se encuentra a los gases liberados a partir de la evaporación de los combustibles líquidos almacenados en el tanque de los vehículos. Algunos ejemplos de estos corresponden a los óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y compuestos orgánicos volátiles, o VOC por sus siglas en inglés (Mamaghani et al., 2017).

### Deaths by risk factor, World, 2021



The estimated annual number of deaths attributed to each risk factor<sup>1</sup>. Estimates come with wide uncertainties, especially for countries with poor vital registration<sup>2</sup>.

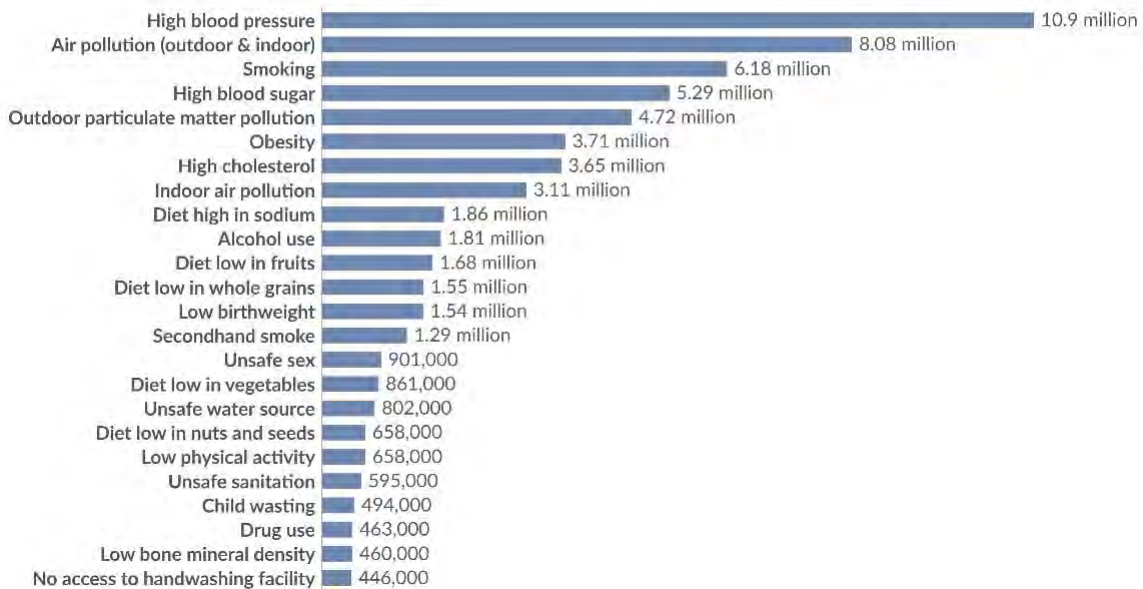


Figura 1. Gráfico de muertes según factores de riesgo IHME. Recuperado de Global Burden of Disease (2024) – with minor processing by Our World in Data. “High blood pressure”. Licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Estos últimos se describen como compuestos en cuya estructura se encuentra como mínimo un átomo de carbono y uno de hidrógeno, y que además poseen un punto de ebullición no mayor a los 260 °C. Algunos ejemplos de VOC corresponden a diversos alcoholes, compuestos aromáticos como el benceno, tolueno, o aldehídos como acetaldehído o formaldehído. Estos compuestos orgánicos representan un gran problema para la salud humana debido a su toxicidad: muchos de estos son irritantes, mutagénicos, carcinógenos y teratogénicos (Weon et al., 2019).

Los VOC pueden provocar cuadros de enfermedades crónicas como asma e insuficiencia respiratoria en las personas en contacto continuo a estos contaminantes. Así mismo, se ha reportado que exposiciones a grandes concentraciones de VOC en el aire pueden tener consecuencias más severas como fallas en el sistema nervioso central, reacciones alérgicas graves y problemas de irritación a las mucosas del tracto respiratorio y ocular (Nath et al., 2016; Mamaghani et al., 2017).

Por otro lado, los contaminantes secundarios se forman indirectamente a partir de la interacción entre contaminantes primarios. Un claro ejemplo es el de la formación de ozono en capas bajas de la atmósfera, que afecta a zonas rurales y alejadas de los puntos originales de emisión de los contaminantes. La lluvia ácida también corresponde a un contaminante secundario que se genera luego de que los óxidos de nitrógeno emitidos como producto de combustión de vehículos son oxidados a  $\text{NO}_3$  y finalmente mezclados con el agua de lluvia, precipitan como ácido nítrico, lo cual afecta especialmente a las construcciones y patrimonio exterior debido a efectos de corrosión, así como también dañar a los campos de cultivo (Calvo, 2016). En la Figura 2 se muestra las relaciones entre ambos tipos de contaminantes y su presencia en el medio ambiente.

## 1.2. Métodos actuales de remediación ambiental

Se han estudiado diversos métodos con el objetivo de reducir los niveles de contaminación en el aire. Uno de los más empleados corresponde a la adsorción sobre carbón activado o sobre materiales de elevada porosidad. Sin embargo, los adsorbentes requieren ser constantemente reemplazados, además de que su efectividad se reduce en condiciones de alta humedad ya que se genera una competencia de los contaminantes con las moléculas del agua del ambiente sobre los adsorbentes, y porque son de un elevado costo y sus mecanismos de acción pueden conllevar a la formación de otros contaminantes dañinos (Roy, 2019).

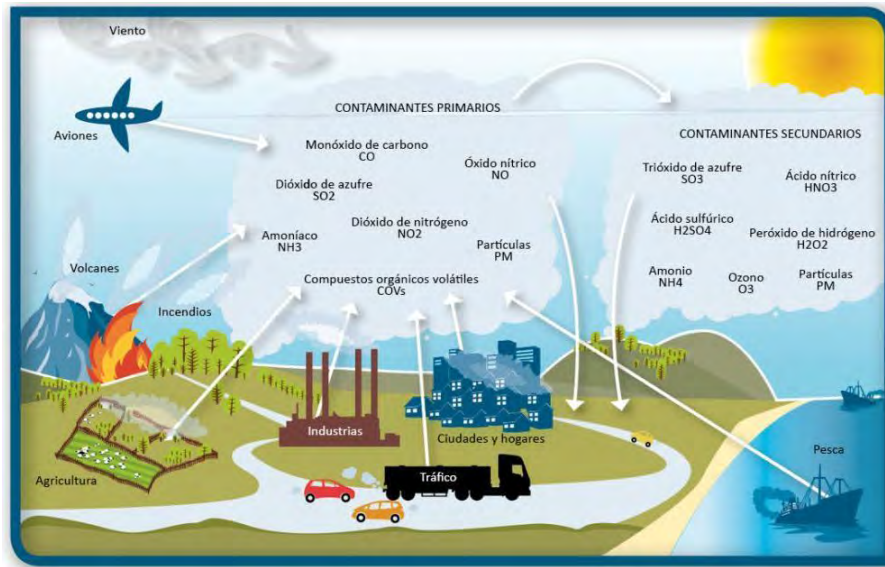


Figura 2. Esquema de distribución de los contaminantes primarios y secundarios. Recuperado de Ariyaratne, Rajitha & Report, M. (2023). Application of air pollution monitoring sensor networks and modelling techniques to manage ambient air pollution in Kandy City, Sri Lanka. [Licencia CC BY-NC-ND 4.0.](#)

Otro método consiste en el uso de plasma térmico, cuya técnica es ampliamente empleada para remover contaminantes orgánicos como los VOC que se generan en aplicaciones industriales. En general, es una solución efectiva en el tratamiento de desechos con altos niveles de contaminantes orgánicos, pero que no resulta económicamente viable para desechos con niveles bajos. Además, especies contaminantes como ozono u óxidos de nitrógenos son emitidos durante su uso a temperaturas bajas de plasma (Wu & Liu, 2020).

También se ha aplicado métodos de descontaminación mediante ionización para remover partículas de polvo y aerosoles que contienen VOC en el aire. Sin embargo, el uso de esta técnica genera la acumulación de cargas, lo que produce descargas electrostáticas, así como también genera emisiones de ozono (Cernecký et al., 2015).

### 1.3. Fotocatálisis como alternativa para remediar problemas de contaminación ambiental

Una alternativa a estas medidas corresponde en el empleo de fotocatalizadores en diversos materiales de construcción, una práctica que comenzó a realizarse en la década de 1990 en Japón (Hashimoto et al., 2005). La fotocatalisis nos permite convertir contaminantes nocivos en especies de menor toxicidad mediante irradiación con luz UV sobre semiconductores que poseen actividad catalítica. De este modo, la fotocatalisis es empleada para diversas aplicaciones de remediación ambiental, algunos ejemplos

corresponden a la desinfección de masas de agua mediante el uso de diques y represas recubiertas con materiales cementicios fotocatalíticos; limpieza del aire mediante el uso de sistemas de filtros con agentes fotocatalíticos para su uso en interiores, o mediante el empleo de recubrimientos cementicios fotocatalíticos en carreteras, murales y aceras para exteriores. (Haider et al., 2019).

La actividad fotocatalítica de los materiales se genera con la absorción de fotones de energía mayor a la banda de energía del semiconductor, de este modo los electrones de la banda de valencia son excitados por la absorción de estos fotones y se desplazan hacia la banda de conducción, con lo que finalmente se generan la formación de vacancias con carga positiva en esta banda.

Estas zonas vacantes pueden aceptar electrones del entorno con lo cual se genera una recombinación, sin generación de especies oxidantes; o la segunda ruta que ocurre en menor proporción es que los portadores de carga migren hacia la superficie del fotocatalizador, en donde los electrones pueden reaccionar con el oxígeno molecular para producir radicales de superóxido, mientras que las vacancias causan la oxidación de las moléculas de agua en la superficie con lo que se obtienen radicales hidroxilo (Sakar et al., 2019).

Ambas especies formadas se conocen como especies reactivas de oxígeno (ROS por sus siglas en inglés), y son las responsables de la descomposición de los contaminantes presentes en especies como dióxido de carbono y agua (Weon et al., 2019). En la Figura 3 se presenta un esquema del proceso de fotocatalisis en semiconductores y formación de especies reactivas de oxígeno ante una fuente energética, como la radiación solar.

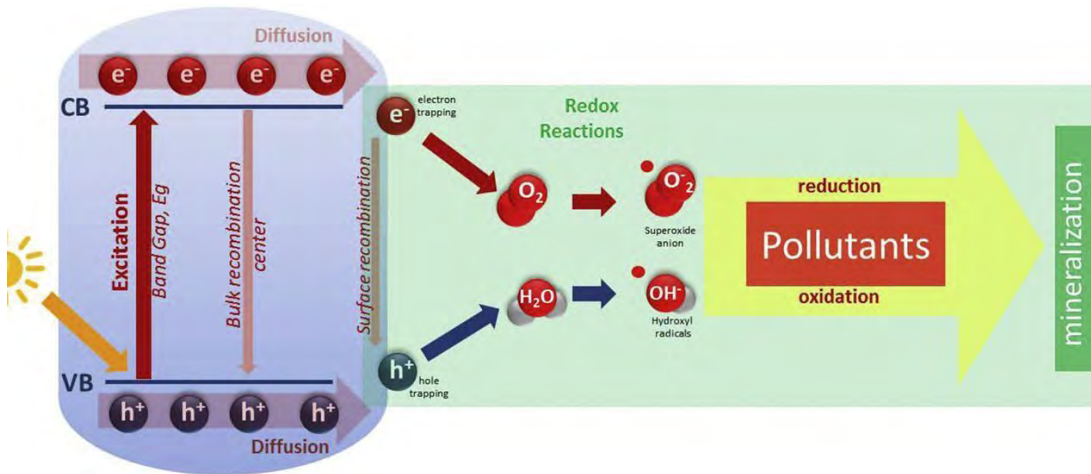


Figura 3. Fases principales de la fotocatalisis con semiconductores (Recuperado de Binas et al. (2017) Modified TiO<sub>2</sub> based photocatalysts for improved air and health quality. *Journal of Materiomics*, 3(1), 3–16. [Licencia CC BY-NC-ND 4.0](#)

De este modo, la fotocatalisis descompone a los contaminantes, como los VOC, en productos de baja o nula toxicidad como dióxido de carbono y vapor de agua mediante mineralización, en comparación a los métodos clásicos de purificación de aire que se basan en la absorción de los contaminantes (He et al., 2021).

#### 1.4. Óxido de titanio y sus aplicaciones como agente de fotocatalisis

Dentro de los fotocatalizadores más estudiados se encuentran los óxidos de titanio, circonio, tungsteno, zinc y estaño, de los cuales el primero es el de mayor utilización para esta aplicación debido a su bajo costo relativo, lo que se relación con su abundancia que es de 0.44% en la corteza terrestre (Westerhoff et al., 2011). Además, posee una buena estabilidad química, baja corrosividad y toxicidad, presenta una elevada fotoestabilidad, y también exhibe propiedades fotocatalíticas notables que le permiten descomponer sustancias orgánicas e inorgánicas (Döndüren & Al-Hagri, 2022).

Existen cuatro polimorfos de dióxido de titanio en la naturaleza: anatasa, rutilo, brookita y dióxido de titanio monoclinico, de los cuales los dos primeros son los más conocidos y los que mayor aplicación tienen en fotocatalisis. La anatasa corresponde a la de mayor actividad fotocatalítica, mientras que el rutilo es la más estable desde el punto de vista termodinámico. La estructura cristalina de estas dos fases está constituida por cadenas de octaedros de TiO<sub>6</sub>, pero conectados de diferente forma. Por ejemplo, en la anatasa se aprecia que los octaedros comparten cuatro bordes, mientras que en el rutilo solo existen

dos bordes compartidos entre los octaedros vecinos (Godbert et al., 2018). En la Figura 4 se muestran las estructuras cristalinas de los polimorfos de dióxido de titanio (Haggerty et al., 2017).

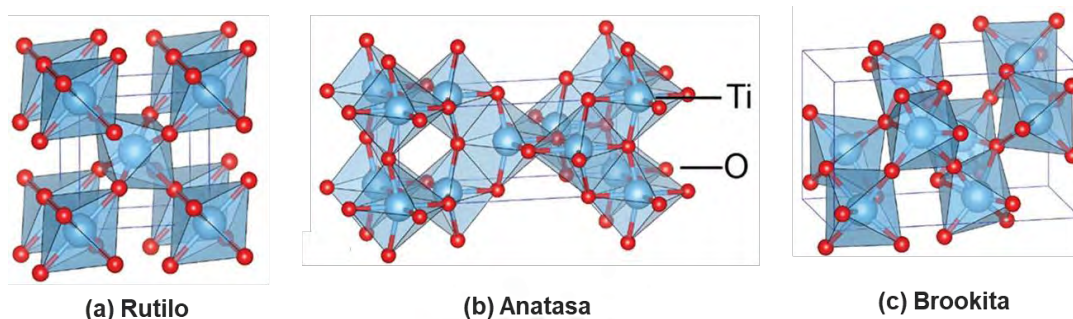


Figura 4. Estructuras cristalinas de los polimorfos de  $\text{TiO}_2$ : rutilo (tetragonal), brookita (ortorrómbica) y anatasa (tetragonal). Recuperado de Haggerty, J.E.S., Schelhas, L.T., Kitchaev, D.A. et al. High-fraction brookite films from amorphous precursors. *Sci Rep* 7, 15232 (2017). [Licencia CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

La mayor estabilidad observada en el rutilo con respecto a la anatasa se puede explicar mediante la tercera regla de Pauling, según la cual las estructuras tienden a poseer una menor estabilidad cuando sus poliedros están conectados por un mayor número de bordes o caras, esto debido a una creciente repulsión entre los núcleos catiónicos (Medvids et al., 2021).

De igual forma, el óxido de titanio es considerado para aplicaciones fotocatalíticas debido a que puede generar la formación de especies reactivas de oxígeno por vías de reducción y oxidación sin requerir modificaciones adicionales a su composición química, lo cual se debe a su potencial de banda. Es importante mencionar que la aplicación de dióxido de titanio sin dopaje como agente de fotocatalisis es primordialmente concebida para aplicaciones en exteriores debido a que, por lo general, la iluminación artificial empleada en interiores posee un bajo nivel de luz ultravioleta, lo cual genera una baja actividad fotocatalítica de esta especie en estas condiciones (Folli et al., 2012).

De este modo, se pueden resaltar dos propiedades clave que hacen que el óxido de titanio sea el candidato adecuado para aplicaciones fotocatalíticas. La primera se relaciona con la propiedad “autolimpiante” que exhiben las superficies que contienen a este semiconductor, luego de ser expuestas a una fuente de luz natural o artificial, como luz solar o en su defecto ante luz ultravioleta. Esta propiedad se relaciona con que el dióxido de titanio en el recubrimiento puede descomponer las moléculas de contaminantes pigmentados orgánicos que se encuentran en su superficie a través de un proceso

conocido como fotocátalisis, estos compuestos orgánicos son utilizados por las partículas inorgánicas como el polvo, para poder adherirse a las superficies. Luego de la degradación de las moléculas orgánicas, se termina de remover los contaminantes remanentes mediante un lavado con agua que proviene en su mayoría de las precipitaciones o del riego (Padmanabhan & Honey, 2020; Abella, 2015).

La segunda propiedad se relaciona con la elevada hidrofiliidad de este material, ya que los restos de los contaminantes que han sufrido los procesos de degradación fotocatalítica pueden ser removidos con facilidad de las superficies de estos materiales con el agua de lluvia, precipitaciones, entre otros (Padmanabhan & Honey, 2020).

El empleo de fotocatalizadores en materiales de construcción constituye un avance importante en el mejoramiento de la calidad de aire mediante la reducción de contaminantes perjudiciales para la salud y la remoción de gases causantes del efecto invernadero. Es importante resaltar que aparte de los beneficios en la reducción de contaminantes debido propiedad catalizadora de estos materiales compuestos de cemento y titanio, la propiedad autolimpiante de estas superficies es de relevancia para la industria cementera y de pinturas, mediante la cual se puede conservar de mejor forma la apariencia de las edificaciones recubiertos con este material, evitando costosos procesos de restauración y mantenimiento, y preservando la estética de estas construcciones, una situación que es bastante crítica especialmente para las estructuras a base de cemento blanco como la iglesia “Dives in Misericordia” ubicada en la capital de Italia, Roma; o el Salón de Música y Artes en Chamberí, Francia que se muestran en la Figura 5.



Figura 5. Edificaciones con recubrimientos cementicios modificados (A) Iglesia Dives in Misericordia en Italia y (B) Salón de Música y Artes en Francia (Recuperado de Andaloro, A et al (2016). Photocatalytic self-cleaning coatings for building façade maintenance. Performance analysis through a case-study application.. Journal of Facade Design and Engineering. [Licencia CC BY-NC 4.0](#)); (C) Sede principal de Air France en París (Recuperado de Certified Material Testing Products. (2024). Photocatalytic concrete: A solution for pollution).

Se han reportado trabajos previos en los que se ha estudiado la fotocatalisis en pinturas, vidrios de ventanas y materiales para pavimentos, así como también algunos estudios sobre su actividad en muestras de cemento realizada por algunos grupos de investigación. La adición de óxido de titanio a los materiales de construcción basados en cemento brinda beneficios a la mezcla obtenida que han sido reportados en la literatura (Dell'Edera et al., 2021).

Además de las propiedades ya mencionadas relacionadas al dióxido de titanio, es importante comentar sobre la capacidad antimicrobiana de este semiconductor, la cual fue reportada por primera vez por Matsunaga et al en 1985, donde se presentaron los resultados exitosos de muerte celular de microorganismos como bacterias Gram positivas, levaduras y algunos tipos de algas, ante su incubación en presencia de dióxido de titanio bajo la irradiación de una lámpara halógena (Matsunaga et al., 1985).

Esta actividad bactericida y fungicida del dióxido de titanio se relaciona con la generación de especies reactivas de oxígeno que se forman durante el proceso de fotocatalisis, en

especial a la formación de radicales hidroxilos. Se describe en la literatura que estas especies atacan a la membrana celular de los microorganismos lo cual desencadena una peroxidación lipídica o degradación oxidativa de los lípidos de la membrana. La combinación del daño a la membrana celular y de diversos daños oxidativos generados en el interior de las células conllevan a la muerte celular de los microorganismos expuestos a la fotocatalisis, el esquema del mecanismo se presenta en la Figura 6 (Haider et al., 2019).

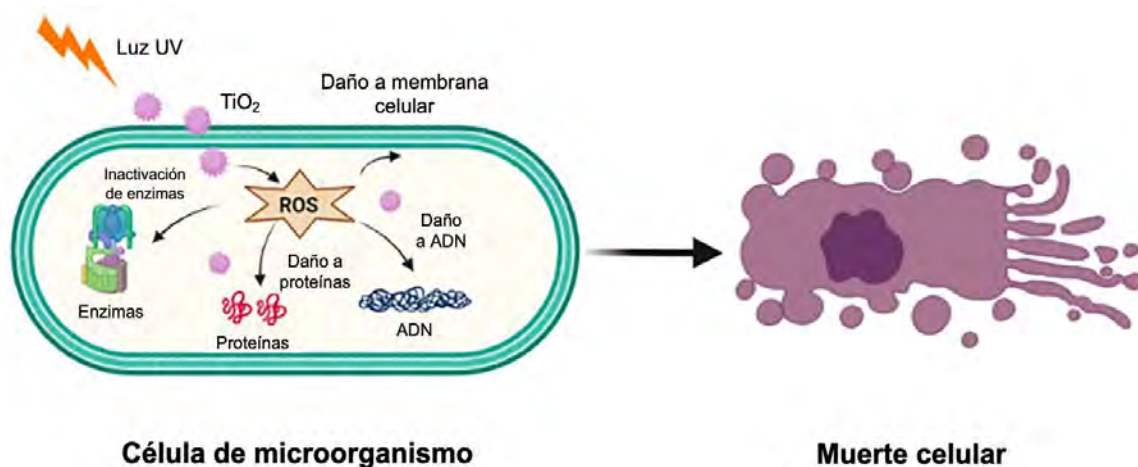


Figura 6. Esquema del mecanismo antibacteriano mediante fotocatalisis de dióxido de titanio (Recuperado de Javed, R. et al. (2022) *Diverse biotechnological applications of multifunctional titanium dioxide nanoparticles: An up-to-date review. IET Nanobiotechnology*, 16(5), 171–189. [Licencia CC BY-NC-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/))

### 1.5. Materiales cementicios con titanio: propiedades mecánicas

Se han realizado estudios acerca de las propiedades mecánicas de los materiales cementicios con adición de óxido de titanio, reportándose en general una mejora de estas, como también un incremento del nivel de plasticidad del material. Casagrande et al reportaron los efectos que tiene la incorporación de titanio en la mezcla con cemento en la trabajabilidad de la mezcla, la cual se estudia mediante el empleo de una mesa de flujo de acuerdo con la norma ASTM C1437.

Su investigación concluyó que la adición del titanio genera una reducción de la trabajabilidad del mortero, de modo que, a un mayor porcentaje de reemplazo del óxido, la trabajabilidad en la mesa de flujo disminuye, esto se debe a la gran área superficial que

poseen las nanopartículas de titanio que pueden adsorber agua (Casagrande et al., 2020; ASTM, 2020).

Según la norma ASTM C125, la trabajabilidad de una mezcla de mortero es la propiedad que determina la cantidad de esfuerzo o dificultad para manipular la mezcla con la menor pérdida de homogeneidad posible, así como también la facilidad con la que se puede trabajar y colocar en los moldes cúbicos. Por ello es importante monitorear esta propiedad y mantener su constancia durante la preparación de diferentes lotes de mezcla de concreto, ya que una disminución de la fluidez debido al exceso de componentes sólidos requeriría un aumento de la cantidad de agua, y con ello una reducción en la resistencia final del mortero (ASTM, 2024).

Otra propiedad mecánica estudiada es la resistencia a la compresión, la cual se analiza mediante la preparación de muestras cúbicas con la mezcla de mortero, y se mide la resistencia con el empleo de una prensa hidráulica, según la norma ASTM C109 (ASTM, 2020).

La reducción de la resistencia a la compresión de las muestras con cantidades mayor al 5% de óxido de titanio se relaciona con la aglomeración y una baja dispersión de las partículas de titanio en la mezcla, con lo cual se generan una distribución no homogénea en la estructura, y con ello zonas de menor resistencia (Ma et al., 2015; Kadhim et al., 2019).

Los trabajos de Molina y Rangel en Colombia, así como la investigación hecha por Martínez en Perú reportan una disminución en la trabajabilidad del mortero mezclado con óxido de titanio, tal como fue descrito en los trabajos mencionados previamente. Además de ello, Molina y Rangel trabajaron con porcentajes de titanio entre 0% y 3%, para lo cual reportaron una resistencia a la compresión máxima para 2% de óxido de titanio de la mezcla, obteniendo menor resistencia para 3% de reemplazo. En la misma línea, el trabajo de Martínez indica que porcentajes mayores de adición de óxido de titanio al mortero de cemento reducen notoriamente los valores de resistencia a la compresión del material, hasta en un 19.5% menos para una mezcla con 10% de óxido de titanio (Rangel & Molina, 2020; Martinez, 2018).

#### 1.6. Propiedades fotocatalíticas de materiales cementicios con titanio

Como se mencionó al inicio de esta sección, uno de los intereses principales de adicionar óxido de titanio a los materiales cementicios es aprovechar sus propiedades fotocatalíticas

y de degradación que tiene sobre los contaminantes del aire que se depositan en la superficie de los recubrimientos de cemento. Existen diversos análisis empleados para analizar la eficiencia fotocatalítica que un material tiene sobre alguna especie contaminante.

Algunos ejemplos de estudios corresponden al trabajo de Hernández et al., 2016, el trabajo de Janus et al., 2020, y el de Jin et al., 2019, reportan el empleo de analizadores de gases para la cuantificación de NO<sub>x</sub>, conectados a un sistema por donde las corrientes de gas son irradiadas por fuentes de luz ultravioleta que desencadenan la actividad fotocatalítica del material cementicio sobre los contaminantes.

Dentro de los métodos existentes, uno de los más aplicados para determinar la eficiencia fotocatalítica de un recubrimiento cementicio corresponde a la prueba de la rodamina que se basa en la norma italiana UNI 11259 publicada por la entidad de normalización Italiana en el 2008 y actualizada en el 2016 (UNI, 2016).

El análisis con rodamina consiste en el monitoreo del grado de descoloración generado a partir de la degradación fotocatalítica que sufre este colorante aplicado sobre una superficie de material cementicio modificado con semiconductores, que en este caso es óxido de titanio, luego de exponerse a radiación ultravioleta durante periodos de tiempo establecidos según la norma. La variación en la coloración de las muestras se controla mediante la colección de los parámetros L\*, a\* y b\* del espacio de color CIE 1976, también conocido como CIELAB, que se miden con un colorímetro o espectrofotómetro (International Organization for Standardization, 2008).

Estos parámetros corresponden a la luminosidad, variación entre el color rojo y verde, y la variación entre el color amarillo y azul, respectivamente. Debido a la coloración magenta intensa de la rodamina en solución que se utiliza en esta prueba, el parámetro del sistema CIE a monitorear es el a\*, que nos brinda información sobre como varía la coordenada en rojo en el sistema de color (Martínez, 2019; Peñafiel & Navarrete., 2019).

De este modo se puede validar si un material cementicio posee actividad fotocatalítica en base a cálculos que se realizan con los parámetros previamente medidos. Para ello se requiere emplear la siguiente fórmula, en la cual R corresponde al factor de eficiencia fotocatalítica a un determinado tiempo, el subíndice "i" especifica el número de horas transcurridas luego del inicio de la exposición a la radiación ultravioleta (UNI, 2016).

$$R_i = \frac{a * R_o - a * R_i}{a * R_o}$$

Así, según la norma, un material puede considerarse como fotocatalítico si como resultado de esta prueba, su factor  $R_4$  corresponde a un valor mayor a 20%, y si su factor  $R_{24}$  es un valor mayor al 50%, siendo  $R_4$  y  $R_{24}$  las mediciones de la variación del parámetro “a” luego de 4 y 24 horas del inicio de la irradiación con luz ultravioleta, respectivamente (UNI, 2016).

A pesar de que existen algunos estudios locales sobre las propiedades fotocatalíticas y mecánicas de la adición de semiconductores como titanio en materiales de construcción cementicios, no se han publicado previamente trabajos de investigación realizados en nuestro país sobre la efectividad fotocatalítica y autolimpiante que presentan los recubrimientos de cemento blanco fabricados localmente y arena peruana que hayan sido modificados con óxido de titanio (Martínez, 2019; Inocencio & Guillermo, 2022).

Es debido a ello que en este trabajo se propone el desarrollo de un recubrimiento de mortero a base de cemento blanco, arena local y dióxido de titanio para empleo en superficies exteriores, así como el estudio de las propiedades mecánicas y la actividad fotocatalítica de este recubrimiento.

## 2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente, la contaminación ambiental es uno de los problemas más severos que debe enfrentar la sociedad, debido al impacto que genera en la salud de los seres humanos, desencadenando enfermedades crónicas respiratorias, y hasta la muerte, por lo que se considera el sexto causante de decesos a nivel mundial según la Organización Mundial de la Salud.

Además de ello, también son relevantes las consecuencias que genera a nivel económico, ya que se requiere una mayor inversión en desarrollar y aplicar técnicas para la descontaminación del aire, agua y demás recursos naturales, así como desde un punto de vista estético para el mantenimiento de las estructuras y edificios cuyas superficies exteriores se ensucian y deterioran por el exceso de contaminantes nocivos en el aire.

En la actualidad se han desarrollado técnicas para la descontaminación del aire como el empleo de filtros, adsorción con carbón activado y la incineración; sin embargo, estos métodos pueden generar productos de descomposición cuya toxicidad sea igual o mayor a los contaminantes iniciales, además de ser generalmente técnicas bastante costosas.

Como una alternativa a estas soluciones, se propuso el empleo de fotocatalisis como una potencial técnica para abatir y reducir los niveles de contaminantes en el aire mediante la degradación de estos compuestos nocivos. Se han reportado varios estudios en los cuales se emplean semiconductores en materiales de construcción, como en el concreto o en pinturas de pared, los cuales conceden propiedades fotocatalíticas con lo que pueden reducir las concentraciones de contaminantes en el aire luego de ser activado por radiación ultravioleta, que puede provenir del sol.

El problema, y a cuya solución esta investigación busca contribuir, es la falta de información específica sobre el empleo de fotocatalizadores en materiales de construcción, como recubrimientos de cemento, y el estudio de su actividad fotocatalítica sobre los contaminantes orgánicos volátiles (VOC).

Sumado a ello, no existen estudios previos en nuestro país sobre la actividad fotocatalítica en los cuales se emplee cemento blanco local y arena peruana para la formulación y desarrollo de un recubrimiento modificado con dióxido de titanio como fotocatalizador con buenas propiedades mecánicas y económicamente viable, ya que la inversión requerida

para el mantenimiento y restauración las estructuras exteriores es comparablemente mayor que los gastos generados por la adición de dióxido de titanio al cemento original.

De este modo, este trabajo constituye el primer estudio que contribuye a la información que se maneja actualmente sobre fotocátalisis en materiales cementicios a nivel nacional con los recursos locales mencionados previamente.



### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. Objetivo general

Desarrollar un recubrimiento económicamente viable a base de cemento modificado con cantidades óptimas de dióxido de titanio y estudiar su actividad fotocatalítica

#### 3.2. Objetivos secundarios

- Desarrollar la formulación de mortero de cemento con dióxido de titanio para la elaboración de un recubrimiento que posea adecuadas propiedades mecánicas y fotocatalíticas
- Caracterizar las propiedades mecánicas de las muestras de mortero desarrolladas
- Estudiar la actividad fotocatalítica de degradación que poseen los morteros modificados con dióxido de titanio sobre la rodamina, que simula los contaminantes orgánicos
- Determinar la relación óptima de cemento y dióxido de titanio en el recubrimiento a partir de los mejores resultados de actividad fotocatalítica
- Estudiar la actividad fotocatalítica y autolimpiante del recubrimiento mediante su exposición a luz UV

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Equipos y reactivos

#### 4.1.1. Equipos

La caracterización de las propiedades mecánicas del mortero de cemento sin modificar y modificado con dióxido de titanio se llevaron a cabo en las instalaciones de los laboratorios de Investigación y Desarrollo, y de Calidad de la empresa COMACSA. En estas instalaciones se realizó el estudio de las propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y medición de la plasticidad de las muestras de mortero mediante el uso de una prensa hidráulica Humboldt para la primera, y una mesa de flujo con controlador automático para el estudio de la segunda.

Ambos equipos mencionados, así como los demás instrumentos y materiales utilizados para la preparación de muestras de cubos y análisis de sus propiedades mecánicas, como moldes para cubos, vernier, tampón, entre otros, se encuentran fabricados y calibrados según las regulaciones establecidas por la normativa local e internacional, y su uso se encuentran sujeto a las especificaciones y ensayos que las normas ASTM establecen. La metodología utilizada para su empleo en la realización de las pruebas se describe con mayor detalle en las siguientes secciones.

Para el estudio de la actividad fotocatalítica, se empleó un espectrofotómetro y colorímetro modelo Elrepho de la marca Datacolor para las mediciones de color en L, a y b. También se utilizó una cámara de iluminación con lámpara ultravioleta de la marca TILO, ambos ubicados en el laboratorio de Investigación y Desarrollo de COMACSA.

Para la caracterización química de las muestras, se empleó un microscopio SEM de la marca FEI para analizar las microestructuras de los recubrimientos desarrollados, este equipo se encuentra en el laboratorio del Centro de Análisis de Materiales (CAM-PUCP). Para el estudio de las fases cristalinas presentes en las muestras de mortero preparadas se utilizó la técnica de difracción de rayos X (XRD), para lo cual se empleó el difractómetro ARL 'XTRA Companion de la marca Thermo Fisher ubicado en el laboratorio de Investigación y Desarrollo de COMACSA.

#### 4.1.2. Reactivos y solventes

Descripción	Proveedor
Rodamina B en polvo (grado p.a.)	Insuquímica SAC
Dióxido de titanio Kronos 2360 (grado industrial)	Kronos Worldwide INC
Hidróxido de calcio (cal hidratada, grado comercial)	COMACSA
Cuarzo granulado M40 (grado comercial)	COMACSA
Cemento blanco “Huascarán” (grado comercial)	COMACSA
Alcohol isopropílico (grado p.a.)	Insuquímica SAC
Agua destilada	-----

#### 4.1.3. Materiales

- Moldes para cubos (Gilson Company, USA)
- Tamper o varilla para moldeo de mortero (Gilson Company, USA)
- Poza de curado
- Espátula de silicona
- Espátula de metal
- Brocha
- Fiolas
- Vasos de precipitado
- Silicona en spray
- Malla M-200 (Gilson Company, USA)
- Mortero de ágata
- Set de mortero y pilón de impacto “Chemplex”
- Discos de lija de grano fino (N° 400)
- Gotero de plástico
- Hojas de papel
- Regla

#### 4.1.4. Instrumentos y equipos

Descripción	Marca
Mezcladora para concreto STJBJ-20	Zhejiang Tugong Instrument Co
Mesa de flujo con controlador H3624	Humboldt
Prensa hidráulica HCM-5080	Humboldt
Cámara de luz “Color Controller P60”	Tilo
Espectrofotómetro “Elrepho”	Datacolor
Difractómetro de rayos X “ARL X’TRA Companion”	Thermo Fisher
Microscopio SEM Quanta 650	FEI
Vernier o calibrador	Mitutoyo
Balanza analítica ME204	Metler Toledo

#### 4.2. Metodología

La metodología descrita en esta sección engloba los procedimientos aplicados para la preparación y desarrollo de la mezcla de mortero de control (a base de cemento puro), y las mezclas de mortero de cemento con dióxido de titanio en diferentes concentraciones; así como también se describen los procesos para realizar la caracterización de las propiedades mecánicas de los morteros de cemento preparados, el procedimiento utilizado para el estudio de la actividad fotocatalítica de las muestras, y finalmente la metodología empleada para la caracterización química de morfología e identificación de minerales presentes en las muestras mediante las técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM) y difracción de rayos X (XRD), respectivamente.

Antes de realizar la preparación de las muestras cúbicas para los ensayos mecánicos o de actividad fotocatalítica, se tuvo que realizar una fase de desarrollo para la formulación de la muestra de mortero de cemento puro, ya que es la mezcla que no contiene agentes

adicionales, como el dióxido de titanio. Para ello se realizaron pruebas donde se fue variando diferentes relaciones de agua/cemento (w/c) en la mezcla de modo que se lograra obtener una adecuada trabajabilidad del mortero de cemento puro mediante el proceso descrito más adelante en la sección 4.2.4, el cual permite analizar el flujo de la pasta. Luego de la fase de desarrollo y pruebas de flujo, se definió la formulación del mortero de cemento puro con una relación óptima de agua/cemento de 0.62.

A partir de esta relación de líquidos y sólidos en el mortero, se continuó con el desarrollo de la formulación de las demás mezclas de mortero de cemento, pero con las modificaciones con dióxido de titanio en diferentes cantidades según la información que se presenta en la Tabla 1. Se debe recalcar que esta misma composición de materiales fue utilizada en las secciones posteriores para la preparación de las muestras de cubos de mortero que fueron utilizados para las demás pruebas de caracterización. La relación óptima de agua/cemento para la mezcla se escoge en base a los resultados que se obtienen del flujo de la mezcla según el procedimiento de la norma ASTM C1437-20.

*Tabla 1. Cantidades de componentes para preparar 9 cubos de mortero de cemento*

<b>Componentes</b>	<b>Porcentaje de dióxido de titanio</b>				
	<b>0%</b>	<b>2.5%</b>	<b>5%</b>	<b>7.50%</b>	<b>10%</b>
<b>Cemento (g)</b>	750.0	731.3	712.5	693.8	675.0
<b>Agua (mL)</b>	465.0	465.0	465.0	465.0	465.0
<b>Arena (g)</b>	2063.0	2063.0	2063.0	2063.0	2063.0
<b>TiO<sub>2</sub> (g)</b>	0.0	18.8	37.5	56.3	75.0
<b>Total (g)</b>	3278.0	3278.0	3278.0	3278.0	3278.0

#### 4.2.1. Preparación de muestras de mortero de control para pruebas de resistencia a la compresión

Se procedió con la preparación de cubos de mortero a base de cemento blanco, cuarzo granulado del tipo M-40 que cumple con las normas estándar ASTM requeridas para el uso de agregado fino en la composición del mortero, y con la adición de agua, siguiendo el proceso indicado por la norma ASTM C109-2024: Standard Test Method for

Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars y ASTM C305: Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency.

Las muestras que se utilizaron para esta prueba consisten en especímenes cúbicos de 5 centímetros de arista, estos cubos deben prepararse con cada una de las mezclas de mortero preparadas. Las muestras de cubos que se prepararon fueron estudiadas en tres diferentes etapas de curado luego de su preparación: a una edad de 3 días, a los 7 días y a los 28 días, según lo que estipulado en la normativa local e internacional.

Los pasos realizados para preparar las muestras de control, es decir sin dióxido de titanio fueron los siguientes:

- A) Se colocó la cantidad de agua medida dentro de un recipiente hondo en la mezcladora de concreto y se fue adicionando el cemento puro, previamente pesado, de forma lenta para evitar que el polvo se salga del recipiente.
- B) Se colocó la mezcla descrita previamente bajo agitación durante 30 segundos a velocidad baja (primer nivel de la mezcladora).
- C) Pasado este lapso, se comenzó a adicionar cuidadosamente la arena en un lapso de 30 segundos con agitación a velocidad baja.
- D) Luego se sometió a la mezcla a una agitación a alta velocidad (segundo nivel de la mezcladora) durante 30 segundos adicionales.
- E) Se detuvo la agitación de la mezcla por 90 segundos, en ese lapso se aprovechó en raspar y remover el material adherido a las paredes altas del recipiente de la mezcladora mediante el uso de una espátula de silicona, y se incorporó al resto de la mezcla del recipiente con ayuda de la espátula.
- F) Luego de ese lapso, se reinició la agitación de la mezcla por 60 segundos adicionales a una velocidad alta.
- G) Se detuvo la agitación y se trasvasó la mezcla a moldes previamente engrasados con silicona en spray. Es importante asegurar que los moldes a utilizar cuenten con las dimensiones establecidas por la norma ASTM C109 para esta prueba.
- H) Se realizó el llenado de los moldes cúbicos según la norma, la cual indica que se debe añadir mezcla hasta la mitad de capacidad de cada molde, luego se debe golpear toda la superficie de la mezcla con ayuda de un tampón o “tamper”

siguiendo un patrón de golpes establecidos por la norma (dirección y cantidad de golpes), como se puede revisar en el Anexo 1.

- I) Al terminar la ronda de golpes sobre la mezcla, se continúa con el llenado total de los cubos con la mezcla remanente y se repite el patrón de golpes usado en el paso "H".
- J) Los moldes se dejaron reposar durante 24 horas cubiertos con un paño de tela en una cámara oscura y húmeda.
- K) Finalmente, luego de transcurrir ese lapso de tiempo, las muestras fueron desmoldadas con bastante cuidado para evitar fracturas o roturas, y se sumergieron en una poza con agua saturada con hidróxido de calcio para comenzar el proceso de curado. Se dejaron en sumersión durante el tiempo estipulado para cada ronda de pruebas de resistencia a la compresión a medir que se indicaron al inicio de esta sección (3, 7 y 28 días). Los demás cubos se dejaron sumergidos en la poza hasta el momento en que fueron utilizados para los demás análisis de caracterización.

#### 4.2.2. Preparación de muestras de mortero modificado para pruebas de resistencia a la compresión

El procedimiento para la preparación de las muestras de mortero modificado con dióxido de titanio es similar al descrito para las muestras de control con cemento puro, a excepción de la primera parte que involucra la adición del óxido.

En la Figura 7 se muestran fotografías del proceso de preparación de los cubos de mortero de cemento y dióxido de titanio con la adición de estos componentes, el aspecto de las muestras luego de ser colocadas en los moldes cúbicos y el proceso de curado en la poza de agua con cal, así como el aspecto final de las muestras de cubos preparadas luego del proceso de curado. Los pasos aplicados fueron los siguientes:

- A) Se colocó el agua dentro del recipiente hondo de la mezcladora de concreto y se adicionó el dióxido de titanio.
- B) Se dejó esta suspensión en agitación durante 60 segundos a velocidad baja

- C) Luego se añadió el cemento indicado a la mezcla y se dejó en agitación por 30 segundos a velocidad baja.
- D) Se continuó el procedimiento siguiendo los pasos descritos en la sección previa desde el ítem D.



Figura 7. Proceso de preparación de cubos de mortero de cemento (Izquierda: mezcla en batidora, Centro: Cubos en moldes y en poza de curado, Derecha: Cubos finales). Autoría propia.

#### 4.2.3. Estudio de resistencia a la compresión de las muestras de mortero

El desarrollo de estas pruebas también se basó en la norma ASTM C109. Para las mediciones a cada edad de los cubos de muestras, se retiraron de la poza de curado en la fecha correspondiente y se secó con cuidado el exceso de humedad con un paño

limpio. Luego se removieron con cuidado las impurezas o partículas como gránulos de arena de las caras que se colocan directamente con las placas superior e inferior de metal para las mediciones en la prensa, estas caras deben ser las superficies laterales que estuvieron en contacto con las paredes del molde durante su envasado, ya que son las más lisas y planas (ASTM, 2024).

Este paso, dependiendo del nivel de incrustaciones o impurezas en la muestra, se puede realizar con ayuda de una pulidora de mesa y discos de lija de grano fino (N°400) que permita remover las partículas irregulares en la superficie del cubo, sin dañar la estructura del mismo.

Después, se colocó el cubo con las placas de metal debajo de la barra superior de sujeción de la prensa, y se encendió la prensa hidráulica. La barra superior fue descendiendo hasta entrar en contacto con la cara superior del cubo, tras lo cual ejerció presión sobre la muestra y el valor de resistencia fue en aumento en la pantalla del equipo. El valor que se registró es la lectura más alta reportada por el equipo durante la prueba, lo cual indica la resistencia a la compresión de la muestra medida. El equipo utilizado para esta prueba se presenta en la Figura 8.



Figura 8. Prensa hidráulica utilizada para medir la resistencia a la compresión de las muestras de mortero. Autoría propia

#### 4.2.4. Estudio de fluidez de las mezclas de mortero desarrolladas

Se determinó la consistencia de las mezclas de mortero preparadas con diferentes concentraciones de dióxido de titanio, lo cual permite monitorear los cambios en la fluidez de los morteros modificados en comparación con el mortero de control que no contiene el dióxido, esta prueba se basó en la norma ASTM C1437: Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar.

Para el desarrollo, se limpió la superficie de trabajo de la mesa de flujo y se colocó el molde de flujo en el centro de esta, de acuerdo a la marca designada en el instrumento. Luego se añadió la mezcla de mortero dentro del molde hasta la mitad de altura de este recipiente, y se homogenizó la superficie mediante golpes a la mezcla con el tampón. Después se terminó de llenar el molde con mortero, se aplicaron golpes para homogenizar y se enrasó la superficie con la ayuda de una espátula para remover el excedente, de modo que quedara una superficie lisa y plana en la zona superior del molde, como se puede visualizar en la Figura 9.



Figura 9. Pasos para realizar la prueba de medición de flujo del mortero de cemento (de izquierda a derecha). Autoría propia.

Al concluir el paso anterior, se limpiaron las zonas de la mesa alrededor del molde de flujo para remover excedentes de mezcla o restos de agua, se retiró el molde de flujo y se activó el motor del instrumento para que la mesa de flujo comience a descender y ascender generando golpes en un lapso de 15 segundos. Finalmente, se midió con un vernier el diámetro en cuatro lados, siguiendo las cotas que indica la propia superficie de la mesa, para así determinar la expansión final de la mezcla que cada mortero formó sobre la mesa luego del proceso de golpes, estas lecturas de diámetro se registraron para su posterior análisis y comparación.

#### 4.2.5. Estudio de la actividad fotocatalítica de mezclas de mortero modificadas con dióxido de titanio

El desarrollo de esta prueba se basó en la norma italiana UNI 11259:2016 para el estudio de la actividad fotocatalítica de morteros de cemento mediante el método de la rodamina: Determination of photocatalytic activity of hydraulic binders - Rhodamine method. Para ello, se preparó una solución de rodamina en agua con una concentración al 0.01%.

Para la preparación de las muestras, se delimitaron círculos de 2.4 centímetros de radio en una de las caras de cada muestra cúbica de cada mortero. El área por fuera del círculo fue recubierta con una capa delgada hidrofóbica de vaselina para mantener la solución de rodamina dentro de la zona de interés. Luego, se adicionaron 0.5 mililitros de la solución de rodamina dentro del área circular delimitada en cada cubo, como se muestra en la Figura 10 y se almacenaron las muestras pintadas en una caja oscura con temperatura y humedad controlada durante 24 horas.

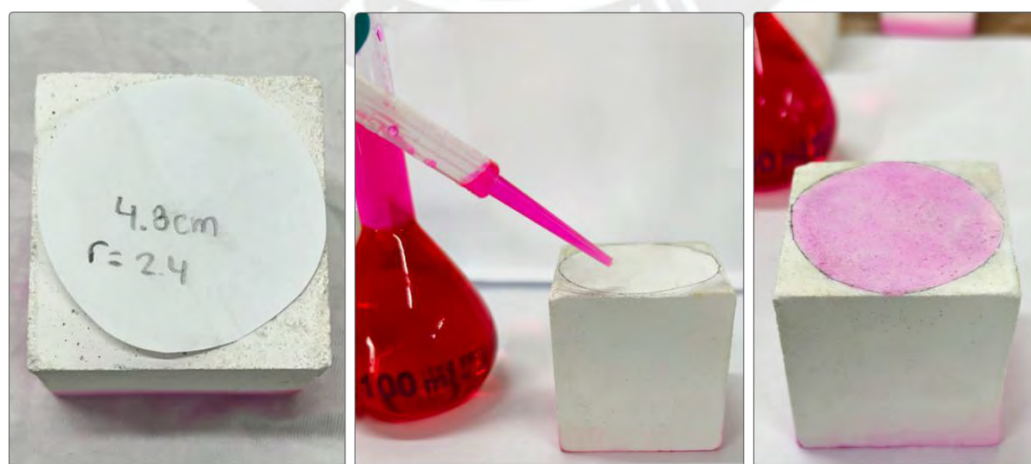


Figura 10. Preparación de cubos para prueba de actividad fotocatalítica. Autoría propia.

Al cabo de este periodo, se realizaron las primeras mediciones de los parámetros L, a y b con el colorímetro Datacolor, es importante recalcar que se tomaron medidas en tres puntos de la zona circular coloreada de forma aleatoria, y luego se calcula el promedio aritmético de las tres lecturas. En la Figura 11 se muestra el equipo utilizado para las mediciones colorimétricas, así como una vista del programa empleado para el manejo del equipo y de recolección de datos.

Después de las lecturas iniciales previa a la exposición a luz UV, se colocaron todas las muestras dentro de la cámara de luz ultravioleta, con la cara pintada con rodamina hacia la dirección de la lámpara (zona superior de la cámara). Finalmente se tomaron mediciones con el colorímetro a las 4 horas y a las 24 horas de iniciada la exposición con luz UV. Con los valores de L\*, a\* y b\* registrados en las tres etapas se puede calcular la actividad fotocatalítica de cada mortero preparado.

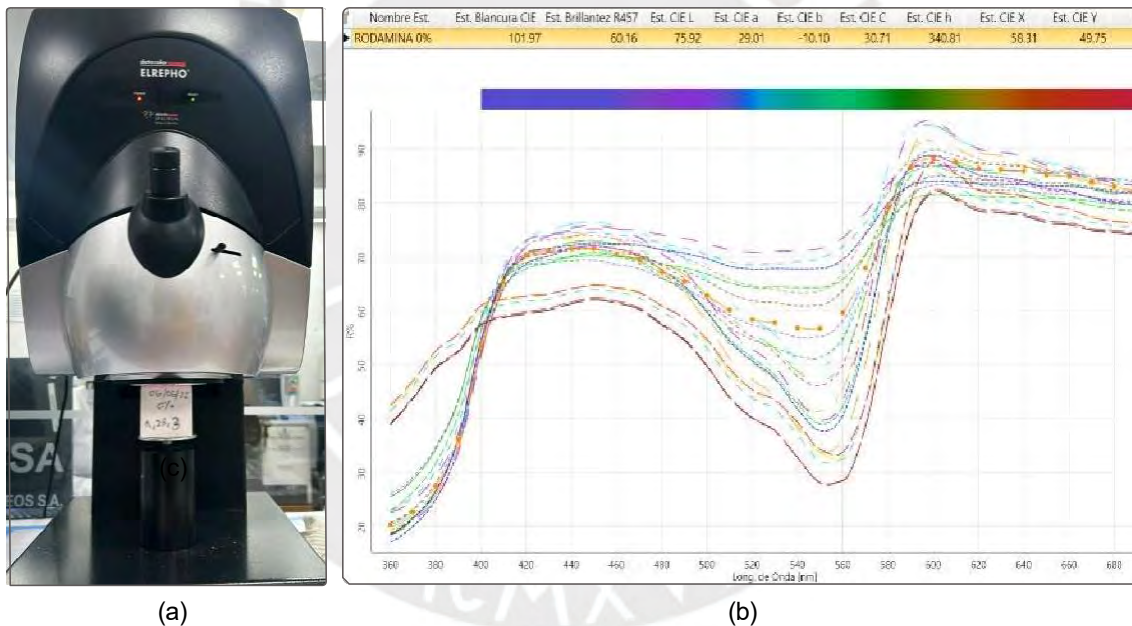


Figura 11. Proceso de medición colorimétrica de muestras de mortero (A: Medición en colorímetro Elrepho, B: ventana del programa DataColor Tools de recolección de datos colorimétricos). Autoría propia.

#### 4.2.6. Caracterización por difracción de rayos X (XRD) de dióxido de titanio

Se estudiaron las fases cristalinas presentes en el dióxido de titanio empleado para el desarrollo de las mezclas de mortero, y también las presentes en el cemento blanco Huascarán utilizado con el mismo fin.

Para la preparación de las muestras, se colocó cuidadosamente el polvo de la muestra a analizar dentro del portamuestras del equipo de difracción, y luego se enrasó con un portamuestras de vidrio, verificando que no quedarán zonas irregulares o con huecos.

Luego, se colocó el portamuestras lleno dentro del difractómetro y se ajustaron los parámetros en el programa de captura Solstix PRONTO como son el rango de datos entre  $5^\circ$  y  $65^\circ$  para ángulos de  $2\theta$ , la longitud de onda de  $1.542 \text{ \AA}$ , y con un tiempo de barrido de 10 minutos por muestra, al terminar de configurar los parámetros, se procedió a tomar los espectros de cada muestra. En la Figura 12 se muestran imágenes del proceso de colocación de la muestra en portamuestras y su colocación en el difractómetro de rayos X.

El estudio de las fases cristalinas presentes en las muestras se realizó mediante el trabajo de los datos en el programa "Match!" versión 4.1 desarrollado por la empresa Crystal Impact para la identificación cualitativa, y del programa Profex versión 5.2 para un análisis más específico de la identidad de los minerales presentes en la muestras.



*Figura 12. Preparación de muestra de dióxido de titanio para análisis por difracción de rayos X. Autoría propia.*

#### 4.2.7. Estudio de microestructuras de mezclas de mortero con dióxido de titanio por microscopía SEM

Con la finalidad de identificar y observar la morfología de las muestras, se analizó los recubrimientos preparados y también el dióxido de titanio utilizado para la modificación

de las muestras de mortero solo. Cada muestra en polvo fue colocada cuidadosamente en un portamuestra.

Para mejorar la resolución de las imágenes, se metalizaron algunas de las muestras con una capa delgada de oro previo a su estudio en el microscopio SEM. Las muestras que se metalizaron fueron las de concentraciones de 10% y 5% de dióxido de titanio, y estas pudieron ser analizadas con el microscopio SEM FEI Quanta 650 con el detector de retrodispersión concéntrica (CBS) a un voltaje de 30 KV y una magnificación de 8000X.

Por otro lado, las muestras de 0% y del dióxido de titanio puro tuvieron que analizarse en el mismo equipo, pero con el detector de campo grande (LFD) debido a la disponibilidad de este en el momento de la toma de muestras, para este detector se utilizó un voltaje de 25 KV y una magnificación de 8000X. En la Figura 13 se muestran algunas de las etapas realizadas para la preparación de las muestras y su análisis en el microscopio SEM.



Figura 13. Preparación de muestras y análisis por microscopía SEM. Autoría propia.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1. Resultados de fluidez de las muestras de mortero

La fluidez de las mezclas de mortero preparados fue estudiada en base a lo estipulado por la norma ASTM C1437, los valores registrados de diámetro durante el trabajo en la mesa de flujo se presentan en la Tabla 2. La fluidez de cada mezcla se calculó mediante la siguiente fórmula, en donde la medida interna del molde utilizado para la prueba sobre la mesa de flujo fue de 98 milímetros, según se aprecia en la Figura 14.

$$\text{Fluidez (A)} = \frac{\text{Promedio de 4 diámetros medidos} - \text{Medida interna de molde}}{\text{Medida interna del molde}} \times 100\%$$

Tabla 2. Resultados del estudio de flujo de las muestras de mortero

Concentración de TiO <sub>2</sub>	Valores en mm				Promedio de diámetros (mm)	Fluidez de mezcla
	Diámetro 1	Diámetro 2	Diámetro 3	Diámetro 4		
0%	209.58	205.94	203.48	207.65	206.66	111%
2.50%	199.62	204.74	205.87	199.94	202.54	107%
5%	195.75	199.63	204.58	201.15	200.28	104%
7.50%	196.87	194.54	198.68	199.28	197.34	101%
10%	192.15	196.45	194.53	197.35	195.12	99%

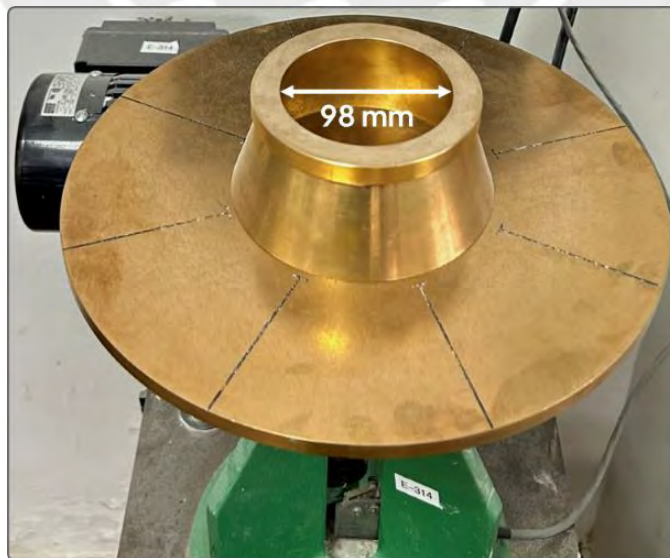


Figura 14. Mesa de flujo y medida interna del molde para estudiar la trabajabilidad. Autoría propia.

A partir de estos resultados se puede observar un descenso en la fluidez de la mezcla conforme el porcentaje de dióxido de titanio se incrementa en las muestras de mortero, lo cual se relaciona con una reducción en la viscosidad de las mezclas de mortero con mayor cantidad de fotocatalizador. En la Figura 15 se presenta una gráfica con los resultados de fluidez obtenidos para cada muestra de mortero preparado.

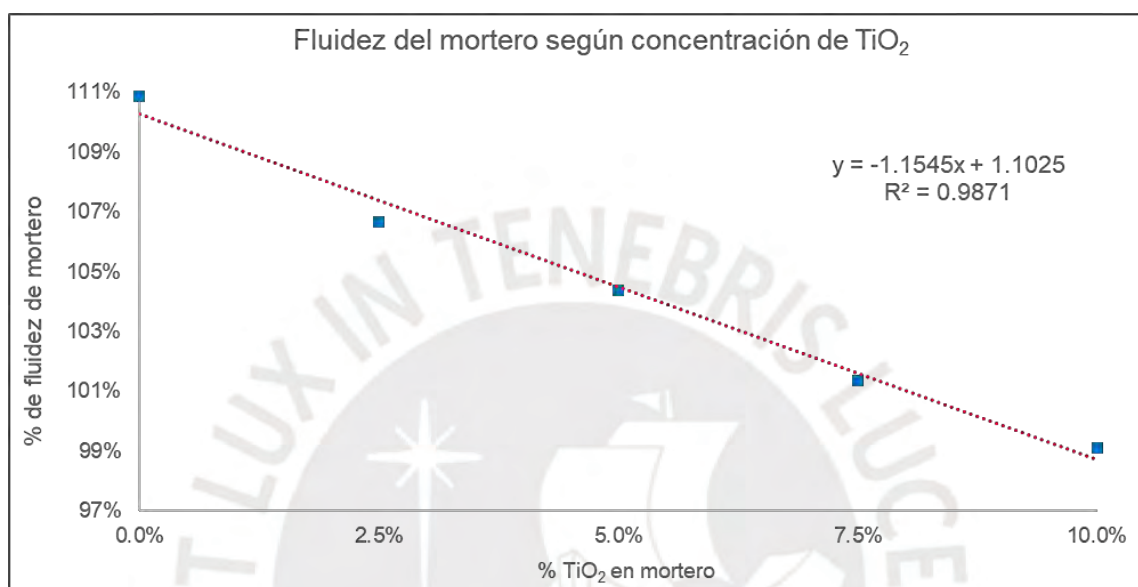


Figura 15. Gráfica de resultados de fluidez de las muestras de mortero preparadas. Autoría propia.

Un mortero de cemento de buena calidad es aquel que tiene una trabajabilidad aceptable en su estado fresco y llega a desarrollar una resistencia adecuada. La propiedad de trabajabilidad es importante debido a que se relaciona con la resistencia máxima de este material, la cual solo se puede alcanzar si el mortero tiene un nivel adecuado de trabajabilidad, y con ello una buena capacidad de autocompactación (Nazari et al., 2010).

Según la norma ASTM C1437 que describe el estudio de plasticidad en mesa de flujo, el flujo aceptable para una muestra de mortero estándar debe variar entre 110% a 115%, mientras que un mortero de baja fluidez exhibe valores menores a 105%, lo cual no es recomendado, especialmente para aplicaciones estructurales. (ASTM, 2020).

Este decrecimiento en la trabajabilidad de la mezcla se puede asociar con el reducido tamaño de las nanopartículas de dióxido de titanio con respecto a la gran área superficial que posee este compuesto, lo cual le confiere buenas propiedades para adsorber moléculas de agua en su superficie (Jędrzejczak, 2023). La principal causa de la pérdida de trabajabilidad es la elevada finura y área superficial de las partículas de rutilo. El dióxido

de titanio usado en morteros generalmente se presenta como un polvo de partículas muy pequeñas y de gran superficie específica. Por ejemplo, un dióxido de titanio comercial tiene partículas de entre 0.3 a 0.7  $\mu\text{m}$  de diámetro, que son más finas que las del cemento Portland cuyo tamaño puede variar entre 10 a 30  $\mu\text{m}$ . De ese modo, el reemplazar una fracción del cemento por dióxido de titanio introduce una cantidad mayor de partículas finas en la mezcla, lo que incrementa el área superficial total de los sólidos.

Como consecuencia, una porción mayor del agua que se utiliza para la preparación del mortero queda adsorbida en las superficies del rutilo para humectar las partículas, en lugar de quedar libres para lubricar la mezcla y contribuir directamente a la plasticidad del mortero (Dantas et al., 2021; Jędrzejczak et al., 2023).

Otro factor ligado a la absorción de agua es la interacción química superficial. El dióxido de titanio es un material que no reacciona con el agua ni con los componentes del cemento para formar productos hidratados adicionales (Jędrzejczak et al., 2023). Sin embargo, sus partículas pueden presentar grupos hidroxilo en la superficie con una alta afinidad por las moléculas de agua, lo que favorece la adsorción de agua en la superficie del óxido.

Debido a ello, Kim et al. (2021) concluyen que la reducción de la trabajabilidad se debe principalmente a que las partículas de dióxido de titanio retienen agua de la mezcla, disminuyendo el agua libre disponible en la pasta cementante.

## 5.2. Resistencia a la compresión de muestras de mortero

De acuerdo con el procedimiento descrito previamente para las mediciones de resistencia a la compresión, se registraron las siguientes lecturas para la resistencia de las cinco muestras de mortero con 0%, 2.5%, 5%, 7.5% y 10% de dióxido de titanio, en cada caso por triplicado para cada edad estudiada. Estos resultados se muestran en la Tabla 3.

De estos resultados se puede observar que la resistencia a la compresión promedio de las muestras exhibe una reducción conforme el porcentaje de reemplazo de dióxido de titanio se incrementa en la mezcla de mortero de cemento, para todas las edades estudiadas en el ensayo.

Tabla 3. Resultados de resistencia a la compresión en kg/cm<sup>2</sup> y MPa para las muestras de mortero

% TiO <sub>2</sub>	Edad	Resistencia promedio (Kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia promedio (MPa)	Desviación estándar
0%	3	277.3	27.6	0.8
0%	7	345.9	34.5	2.9
0%	28	494.1	48.5	1.1
2.50%	3	345.9	24.8	1.6
2.50%	7	403.3	31.5	2.1
2.50%	28	445.0	45.8	1.3
5%	3	494.1	23.8	1.5
5%	7	421.2	28.6	2.0
5%	28	335.0	42.9	1.8
7.50%	3	253.4	21.6	1.6
7.50%	7	271.9	26.4	1.4
7.50%	28	290.3	36.4	3.0
10%	3	305.0	18.5	1.2
10%	7	343.7	24.8	2.5
10%	28	398.7	31.6	1.4

Por ejemplo, para la edad de 28 días se puede observar que la resistencia promedio a la compresión de las muestras sin dióxido de titanio (representadas en la tabla como 0%) es de 48.5 MPa, mientras que las muestras con un reemplazo de 10% de dióxido de titanio presentaron una resistencia promedio de 31.6 MPa de resistencia promedio.

En la Figura 16 se presenta un gráfico con los resultados de resistencia a la compresión obtenidos para cada muestra analizada a diferentes edades de curados, en la cual se puede apreciar con claridad la tendencia de reducción de la resistencia a la compresión conforme se incrementa el porcentaje de reemplazo del dióxido de titanio en la mezcla.

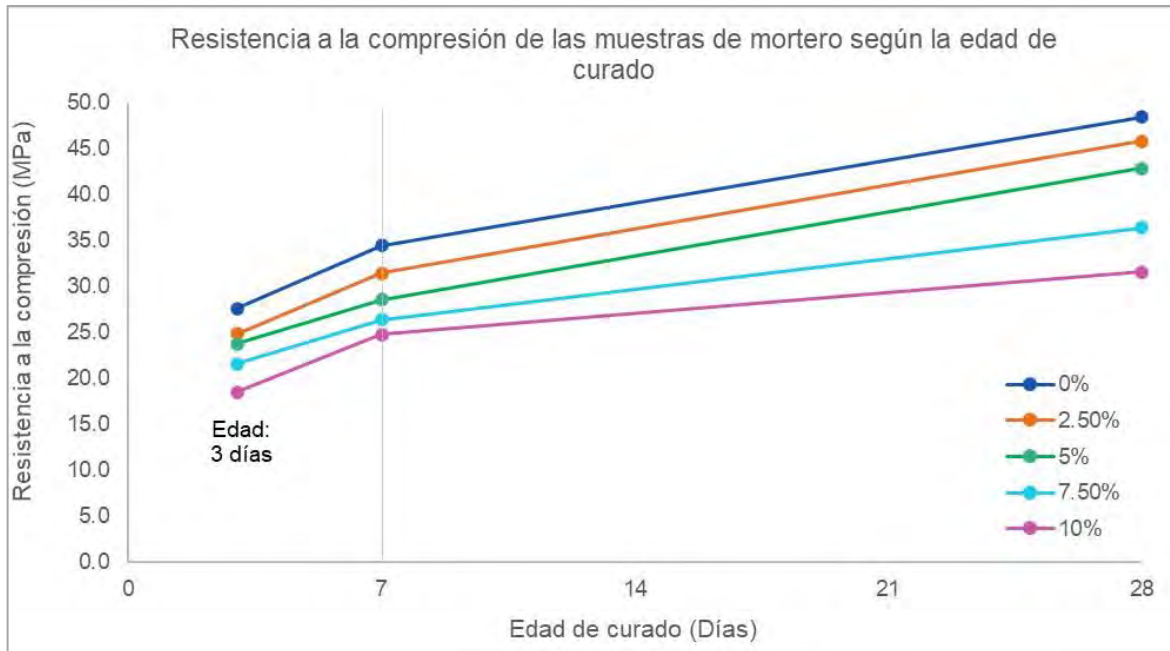


Figura 16. Gráfico de resultados de resistencia a la compresión para muestras de mortero. Autoría propia.

### 5.3. Resultado del estudio de la actividad fotocatalítica y análisis colorimétrico de las muestras de mortero control y mortero modificado con dióxido de titanio

La utilización de semiconductores en los materiales cementicios, en particular la adición de dióxido de titanio, es una alternativa con un interés creciente por parte de la industria de la construcción, así como en el campo de remediación ambiental, debido a los beneficios que puede ofrecer a nivel de descontaminación del aire o de masas de agua, así como también a nivel estético debido a sus propiedades autolimpiantes.

La actividad fotocatalítica y autolimpiante de las muestras fue probada mediante un ensayo con rodamina según lo establecido por la norma italiana UNI 11259. El procedimiento se describió en la sección de metodología, y se registraron los valores de L, a y b de las muestras en tres etapas de la prueba: a tiempo cero o inicial previo a la exposición bajo luz UV, a las 4 horas y a las 24 horas del inicio de la exposición con luz UV.

Los resultados se presentan en la Tabla 4, donde se muestran los cálculos de  $R_4$  y  $R_{24}$  para determinar la actividad fotocatalítica de los morteros desarrollados. Además, en la Figura 17 se presenta un gráfico donde se puede apreciar la tendencia de variación de parámetro "a" para cada una de las muestras estudiadas, a las edades de 3, 7 y 28 días.

Tabla 4. Resultados de actividad fotocatalítica de las muestras de mortero preparadas.

%TiO <sub>2</sub>	a (0)	a (4)	R <sub>4</sub>	R(4)>20%	a (24)	R <sub>24</sub>	a(24)>50%	¿Es fotocatalítico?
0.0%	30.42	28.35	7%	No	27.60	9%	No	No
2.5%	26.12	14.78	43%	Sí	8.62	67%	Sí	Sí
5.0%	27.84	14.35	48%	Sí	7.89	72%	Sí	Sí
7.5%	28.04	14.38	49%	Sí	7.70	73%	Sí	Sí
10.0%	28.61	13.46	53%	Sí	6.93	76%	Sí	Sí

De los resultados presentados, se puede observar que la muestra de cemento puro que no incluye dióxido de titanio exhibe valores del parámetro a\* similares a la inicial luego de la exposición a luz UV por cuatro y veinticuatro, y con valores de R<sub>4</sub> y R<sub>24</sub> de 7% y 8%, respectivamente, menores a los límites de 20% y 50% que estipula la norma UNI 11259 para que un material pueda ser considerado como fotocatalítico.

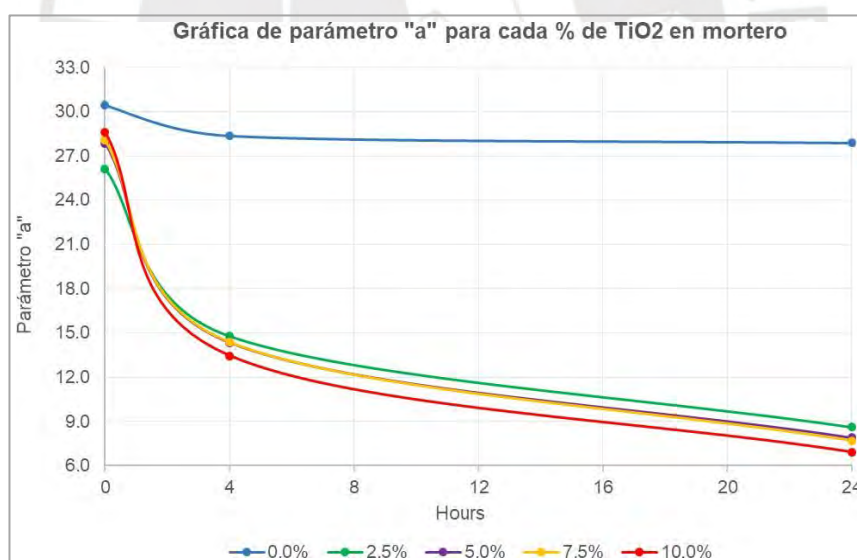


Figura 17. Gráfica de resultados del parámetro "a" medido para las muestras de mortero preparadas. Autoría propia.

Por otro lado, se puede observar que los valores de R<sub>4</sub> y R<sub>24</sub> de los morteros con dióxido de titanio, incluso a una concentración de 2.5%, son mayores que el límite mínimo estipulado por la norma UNI. De este modo se puede concluir que las cuatro mezclas de

mortero que contienen dióxido de titanio se pueden considerar como materiales fotocatalíticos.

Además, se debe recalcar que el hecho de que incluso la muestra con menor porcentaje de reemplazo con dióxido de titanio presente actividad fotocatalítica es bastante beneficioso, esto debido a que se puede desarrollar un material con buena actividad fotocatalítica y autolimpiante, con un bajo impacto de las propiedades mecánicas, y sobre todo con una mejor relación costo-beneficio al requerir menores porcentajes de este óxido, lo cual es más atractivo para el entorno industrial.

En la Figura 18 se pueden visualizar las muestras cúbicas de las mezclas de mortero preparadas que fueron sometidas a la prueba de actividad fotocatalítica con rodamina y exposición a luz ultravioleta.

En la figura "18a" se muestran los cubos pintados con rodamina previo al inicio de exposición a luz UV, en la figura "b" se presentan las muestras luego de 4 horas de exposición en la cámara de iluminación, y finalmente la figura "c" presenta el resultado final de los cubos al cabo de 24 horas de exposición a luz UV, donde es clara la reducción en intensidad del color rosado de la rodamina en las muestras que contienen dióxido de titanio, mientras que la degradación en la muestra de cemento puro es casi nula. Estos resultados visuales se relacionan con las mediciones colorimétricas presentadas al inicio de esta sección.

Con los parámetros medidos de L, a y b se realizó un análisis colorimétrico para estudiar la variación de la tonalidad rosada en las muestras luego de ser expuestas a luz UV, mediante su posicionamiento en el diagrama de cromaticidad. Para ello se convirtieron los parámetros medidos en L, a y b hacia el espacio de color en x e y para luego graficarlos con un programa de análisis de color llamado Color Calculator versión 7.7, este es ampliamente utilizado en la industria para realizar cálculos colorimétricos y determinar características como la temperatura del color de diversas fuentes luminosas como tiras de LEDs, lámparas, entre otras. La interfaz del programa se presenta en la Figura 19.

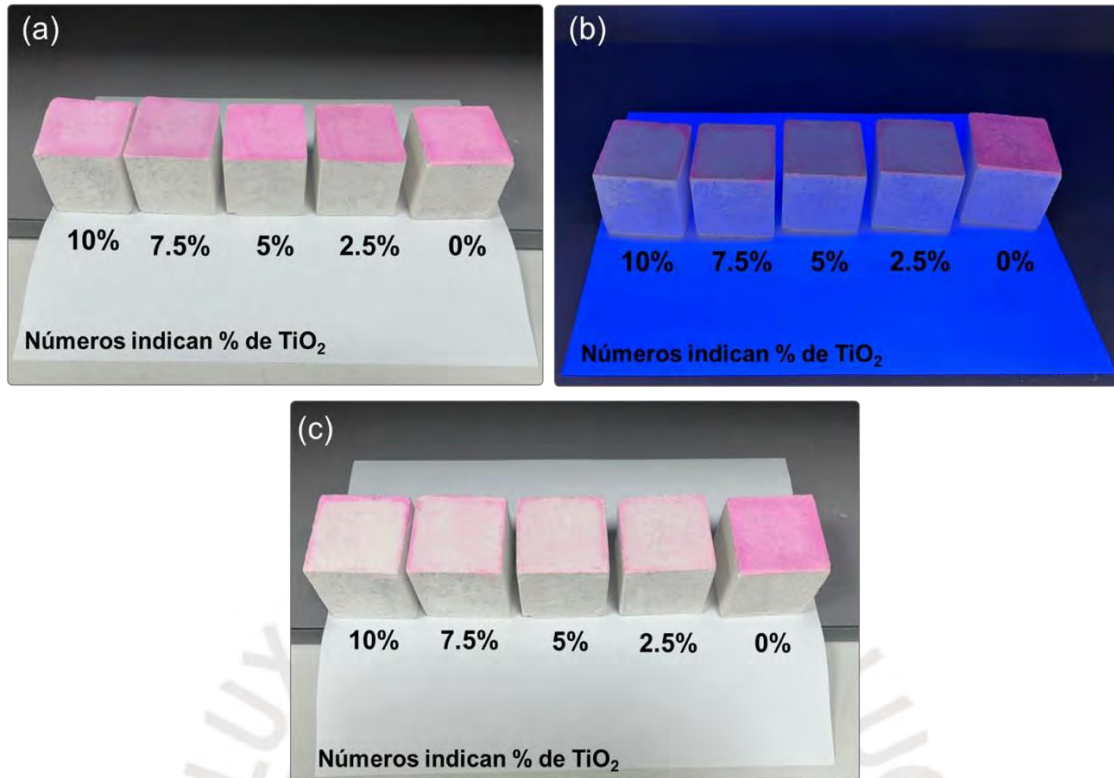


Figura 18. Muestras de mortero de cemento pintadas con rodamina y expuestas a luz UV según prueba UNI 11259 (Autoría propia).

Otra herramienta importante de esta herramienta es que permite calcular las elipses de MacAdam necesarias para englobar a un grupo de mediciones dispersadas en cierto espacio de color. La identificación del número de elipses requeridas para contener a dos puntos referenciales es importante para determinar si la diferencia en color entre los puntos medidos es detectable a simple vista por el ojo humano, o en base a ello se pueden escoger las tolerancias de color aceptables de un producto de modo que cumpla con los estándares de calidad a nivel industrial (Narendran et al., 2004).

El número de la elipse de MacAdam corresponde a la desviación estándar (sigma) de distancia a la que se encuentran los puntos respecto a un punto de referencia. Por ejemplo, en la Figura 20, los puntos A y B se encuentran cada uno a una desviación estándar de distancia del centro de referencia, ya que están en el contorno de una elipse 1 de MacAdam; por otro lado, los puntos C y D se encuentran a dos desviaciones estándar del punto de referencias ya que están contenido dentro de una elipse 2 de MacAdam, y así sucesivamente.

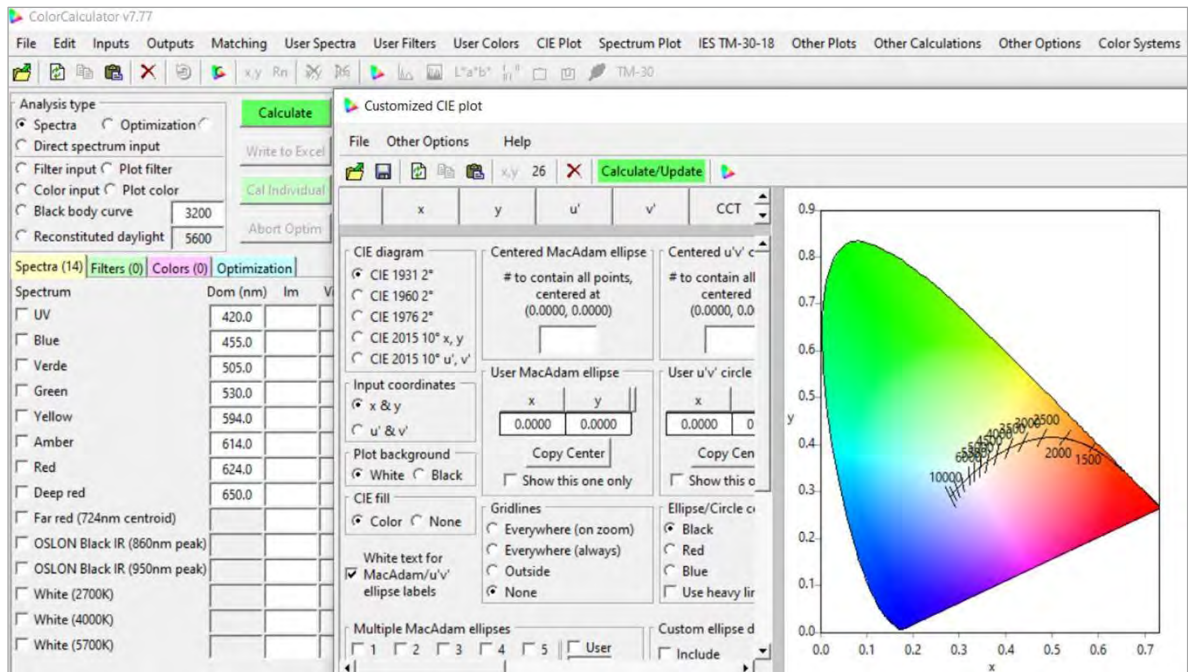


Figura 19. Programa de análisis colorimétrico ColorCalculator v7.77 (Autoría propia)

Antes de realizar las gráficas en el programa ColorCalculator, se realizó una conversión de los valores de L,a,b de cada medición hacia el espacio de color de “x” e “y” para poder ubicarlos en el diagrama de cromaticidad, para esta conversión se utilizó un aplicativo de licencia abierta llamado “ColorMine”, que permite transformar los valores de L,a y b hacia el espacio de color CIE 1931 de XYZ, y con estos últimos se puede determinar los valores de x e y mediante la siguiente fórmula, los datos en función de x e y se pueden graficar en el programa Color Calculator.

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

Los valores promedio de medición en x e y para cada muestra de mortero y en cada tiempo de exposición de interés fueron ubicados en el diagrama de cromaticidad para observar la variación de color de una forma más objetiva. Primero se graficaron los datos de las muestras pintadas con rodamina a tiempo cero, antes de que fueran irradiadas con luz ultravioleta.

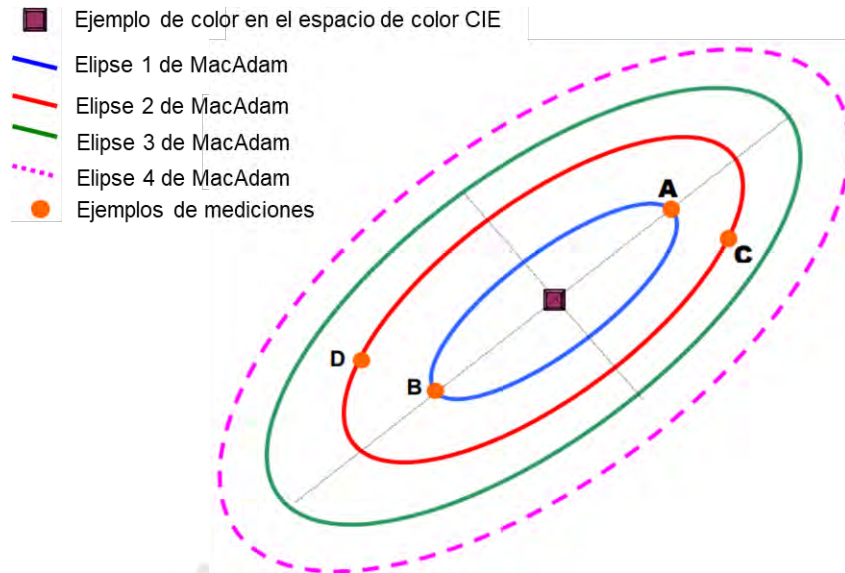


Figura 20. Esquema de elipses de MacAdam para grupos de medición (Recuperado de Sylvania-Osram (2000). *MacAdam Ellipses. What are MacAdam Ellipses or color ovals?*. Licencia [CC BY-NC-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/))

Debido al color fucsia intenso de la solución de rodamina utilizada, los cubos pintados inicialmente tenían una tonalidad bastante similar a este color, lo cual se puede apreciar en la Figura 21. Los puntos de las mediciones tomadas para estas muestras se ubican en una zona intermedia entre el color rojo y el azul en el diagrama de cromaticidad, lo cual se percibe como un tono rosado lila en las muestras de mortero pintadas con la rodamina luego del tiempo de secado.

Para estudiar la variación de color luego de la exposición de luz ultravioleta, se graficaron los datos de las muestras irradiadas durante cuatro horas (representados por los puntos en color azul), y finalmente los datos luego de 24 horas de exposición (representados en color rojo en la gráfica).

Como se muestra en la Figura 21, la tendencia de variación del color en las muestras de mortero pintadas con rodamina es migrar desde tonos rojizos hacia un color más cercano a un blanco cálido propio del mortero de cemento blanco puro, alrededor de los 5600 K, conforme se incrementa el tiempo de exposición a la luz ultravioleta, como se puede ver en la ampliación de la gráfica en la derecha de la Figura 22.

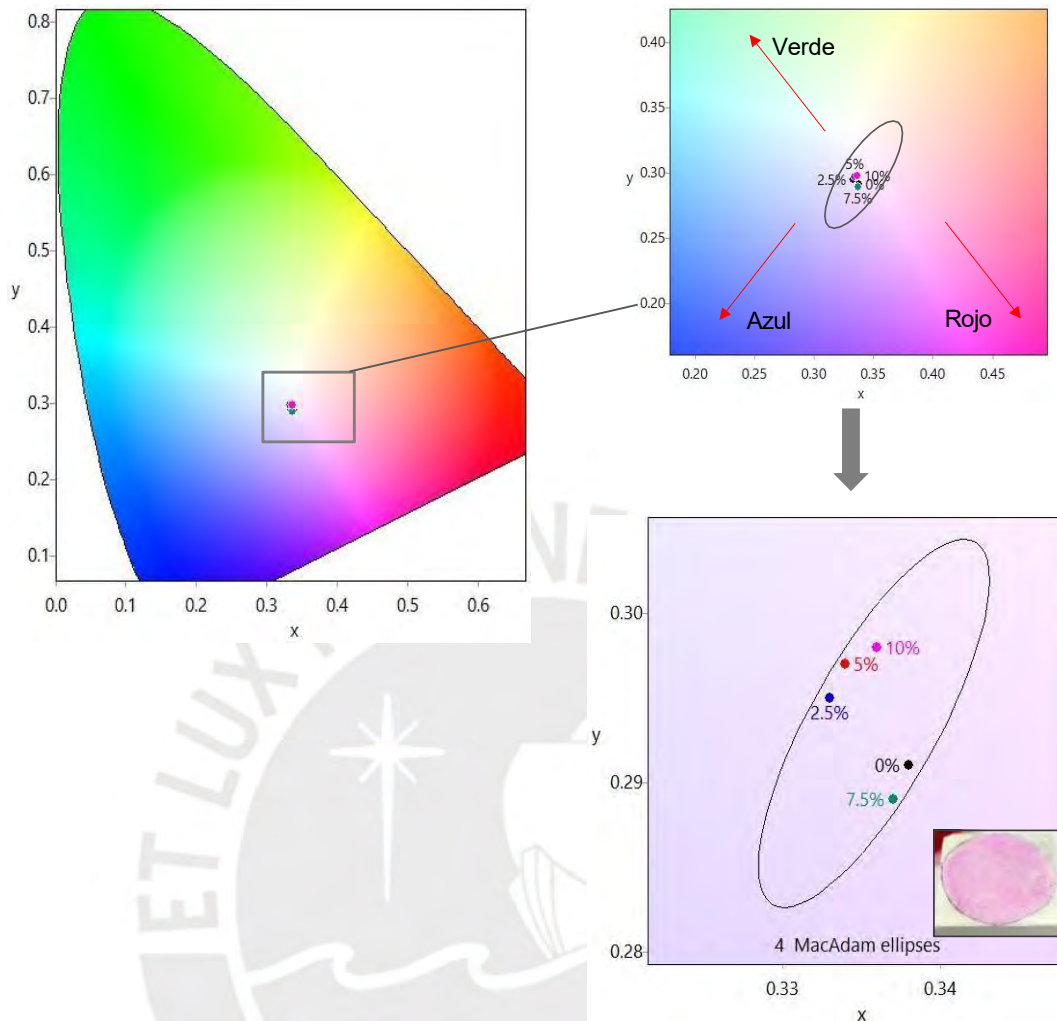


Figura 21. Gráfica de color de las muestras de cubos de mortero pintados con rodamina a tiempo inicial (Autoría propia).

Se puede observar una gran variación de color entre las lecturas a tiempo inicial y las de cuatro horas para las muestras que contienen dióxido de titanio en el mortero de cemento, debido a que en este primer lapso es donde se da un cambio de color más notorio, debido a la degradación de la rodamina en este proceso. No se logra identificar una variación considerable mediante el análisis colorimétrico entre las muestras de mortero con diferentes porcentajes de dióxido de titanio, solo se puede identificar que estas muestras sí exhiben una descoloración luego de la exposición ante luz ultravioleta que se puede concluir a partir de una migración hacia el color blanco en el diagrama de cromaticidad.

La variación de color al cabo de 4 horas y 24 horas es comparablemente menor, lo cual nos indica que se puede obtener una buena propiedad autolimpiante y fotocatalítica de contaminantes incluso en periodos menores de un día de exposición a luz ultravioleta, ya

que las muestras que sí se comportaron como fotocatalíticas lograron degradar la rodamina de los cubos de mortero en casi su totalidad lo que se evidencia con la reducción del color fucsia rojizo en las muestras.

Por otro lado, se evidencia que las muestras de mortero de cemento sin dióxido de titanio no sufrieron una variación de color en las caras del cubo pintadas con rodamina luego de cuatro y veinticuatro horas de exposición a luz ultravioleta, esto nos permite recalcar el hecho de que este material no posee una actividad fotocatalítica, lo cual se relaciona con la ausencia de dióxido de titanio en su composición.

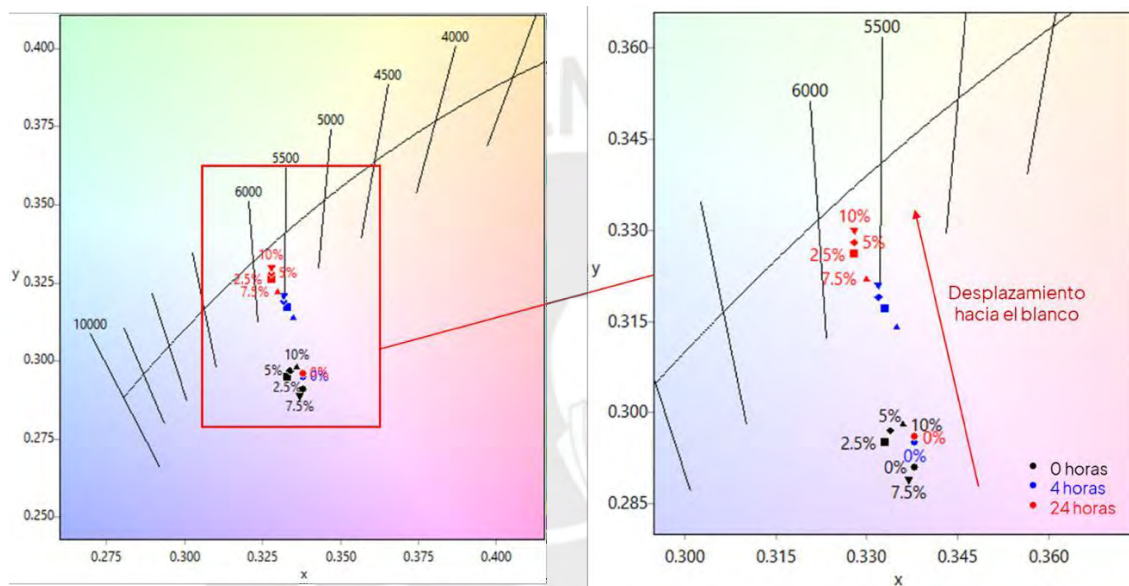


Figura 22. Comparación de variación de color para las muestras de mortero expuestas a diferentes tiempos de irradiación (Autoría propia).

#### 5.4. Resultados del estudio de fases cristalinas de dióxido de titanio, cemento y muestras de mortero mediante difracción de rayos X

Para el estudio mediante difracción de rayos X se utilizó el difractómetro ARL'XTRA disponible en las instalaciones de COMACSA, el cual se emplea para la caracterización de los minerales que procesan y utilizan en la preparación de sus productos, como el cemento blanco. Para la preparación de las muestras y su inserción en el equipo se siguió el procedimiento descrito en la sección de metodología, el manejo del equipo se realizó mediante el programa Solstix, mientras que el espectro en crudo obtenido de la muestra fue trabajado y analizado mediante el uso de dos programas disponibles: el software Match!, y el software Profex.

El primer análisis realizado fue el estudio de la muestra en polvo de dióxido de titanio la cual fue la que se utilizó para el desarrollo de los morteros de cementos, de modo que se pueda identificar las fases cristalinas presentes en la misma. El espectro obtenido fue analizado con ambos programas mencionados previamente, lo cual permitió identificar la presencia mayoritaria de rutilo en la muestra, en base a la coincidencia de señales obtenidas y su comparación con la base de datos que utiliza el programa, que es la Base de Datos de Cristalografía de Acceso Libre (COD-2025), con una coincidencia por la especie 96-153-0151(rutilo).

Esto coincide con la información que se indica en la hoja técnica del polvo de dióxido de titanio marca Kronos 2360 utilizado para la preparación de los morteros de cemento, en la cual se especifica que la fase cristalina mayoritaria de este producto es el rutilo. En la Figura 23 se muestra el difractograma analizado para el dióxido de titanio donde el rutilo es la especie predominante con un sistema cristalino tetragonal, donde se identifican las siguientes señales con un  $2\theta$  de:  $27.40^\circ$ ,  $36.06^\circ$ ,  $39.17^\circ$ ,  $41.23^\circ$ ,  $44.03^\circ$ ,  $54.32^\circ$ ,  $56.62^\circ$ ,  $62.78^\circ$  y  $64.06^\circ$ , las cuales se relacionan con los planos de difracción (110), (101), (200), (111), (120), (211), (220), (002) y (130), respectivamente.

En la Tabla 5 se presenta la lista de señales obtenidas del difractograma de la muestra de dióxido de titanio donde se incluye información del ángulo  $2\theta$  y área de cada pico, así como los índices de Miller.

Tabla 5. Relación de picos e índices de Miller obtenidos para la muestra de dióxido de titanio

N° de pico	$2\theta$	d [Å]	Área del pico	Índices de Miller		
				h	k	l
1	27.4	3.2527	4426.08	1	1	0
2	36.06	2.4886	1573.39	1	0	1
3	39.17	2.2978	6.95	2	0	0
4	41.23	2.188	715.48	1	1	1
5	44.03	2.0551	74.31	1	2	0
6	54.32	1.6875	1954.17	2	1	1
7	56.62	1.6241	617.75	2	2	0
8	62.78	1.4788	93.01	0	0	2
9	64.06	1.4524	37.5	1	3	0

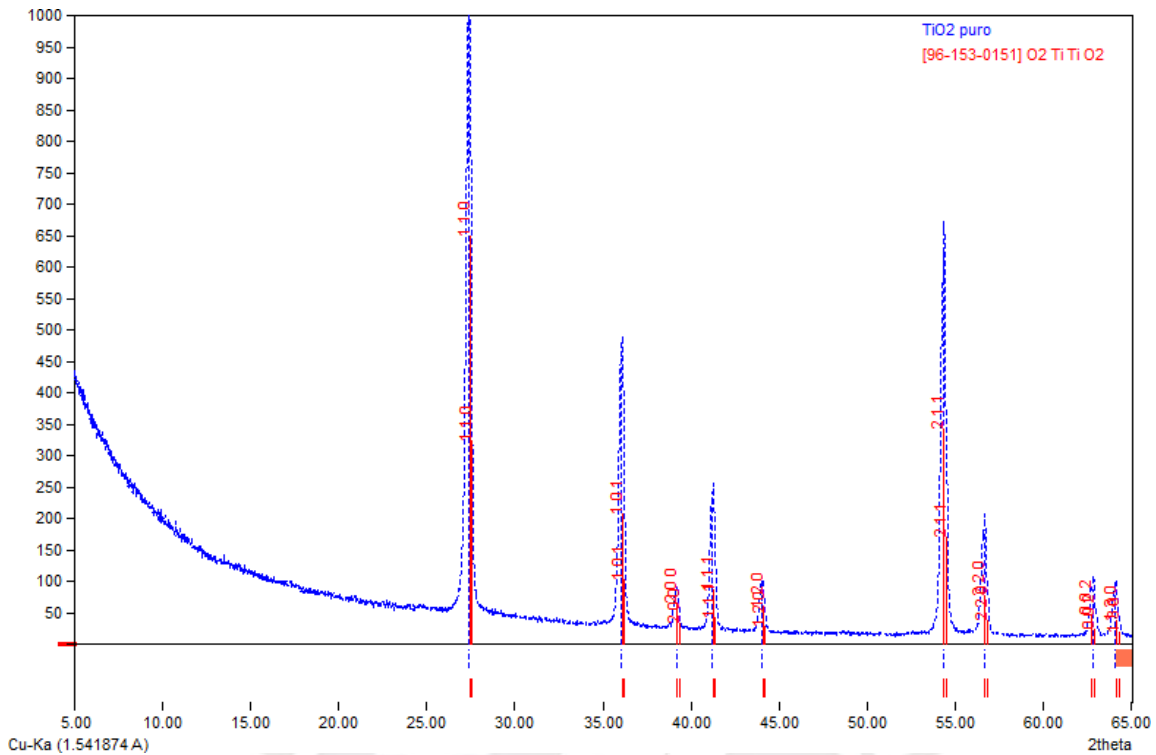


Figura 23. Difractograma de rayos X de muestra de dióxido de titanio Kronos 2360 (código JCPDS de rutilo: 21-1276). Autoría propia.

A partir de los datos obtenidos que se muestran en la Tabla 5, se halló el tamaño del cristalito del rutilo presente en el dióxido de titanio mediante la ecuación de Scherrer según la siguiente fórmula (Muniz et al., 2016), en la cual “D” corresponde al tamaño del cristalito a calcular, “K” es la constante de forma que se toma como 0.9, “λ” corresponde a la longitud de onda de la fuente de radiación, que para este caso fue de cobre y con un  $K\alpha$  de 1.5406 Å, β corresponde al ancho del pico a media altura o FWHM en radianes, que se obtiene del programa Profex donde se procesó el difractograma, para un valor de 0.00454 radianes, y donde θ corresponde a la mitad del ángulo 2θ de difracción en radianes del pico de mayor intensidad del difractograma, que es de 27.4° para este caso.

$$D = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta}$$

$$\beta = 0.26^\circ \cdot \frac{\pi}{180} = 0.00454 \text{ rad}$$

$$D = \frac{0.9 \cdot 1.5406}{0.00454 \cdot 0.971} = 31.4 \text{ nm}$$

El valor obtenido confirma que el óxido de titanio presente en la muestra se encuentra en forma nanocrystalina, lo cual es relevante desde el punto de vista fotocatalítico. Si bien la fase rutilo posee menor actividad intrínseca que la anatasa, la reducción del tamaño de cristalito a escala nanométrica incrementa la superficie específica y favorece la generación de especies reactivas al recibir radiación UV. En el contexto de materiales cementicios, esta característica es beneficiosa para el desarrollo de morteros con propiedades autolimpiantes y descontaminantes, especialmente cuando se emplean en recubrimientos superficiales expuestos a la intemperie. Por lo tanto, el tamaño observado sugiere un comportamiento fotocatalítico potencialmente favorable del rutilo incorporado en la matriz cementicia (Hossain & Ahmed, 2023).

También se estudió por esta técnica el cemento blanco "Huascarán" fabricado por COMACSA, el cual se empleó como base en la preparación de los morteros. Según lo que se reporta en la literatura, el análisis de XRD de cemento puede mostrar fases cristalinas como la alita o la belita, así como también a otros componentes que se agregan al cemento como aditivo para mejorar sus propiedades, como es el caso del yeso.

También es importante recalcar que el análisis de muestras de cemento puede ser bastante complicado debido particularmente a una gran superposición de los picos que aparecen en el difractograma, pero también a la coexistencia de numerosos polimorfos en su composición. Por ejemplo, una de las especies más conocidas y mayoritarias que están presentes en el cemento es la alita, que corresponde al silicato tricálcico denominado como C3S, la cual puede encontrarse hasta en tres formas cristalinas diferentes: monoclinica, triclinica y romboédrica.

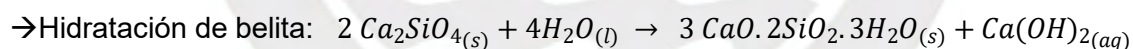
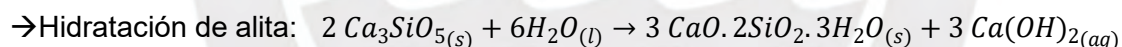
Otra especie que se encuentra presente en el cemento es la belita, que es un silicato dicálcico denotado como C2S, y que puede presentarse en alguno de estos tres polimorfos:  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ . Por otro lado, también se puede encontrar a la celita, o aluminato tricálcico representada por C3A, la cual posee dos posibles polimorfos que se presentan en el cemento, como la fase cúbica o la fase ortorrómbica (Silva et al., 2020).

En el cemento Portland gris también se suele encontrar ferrita (C4AF), pero en la composición del cemento blanco, los minerales utilizados contienen un bajo contenido de elementos colorantes como son el hierro, manganeso y cromo. Por ejemplo, se indica que, en la composición de este cemento, los niveles de óxido de hierro (III) no superan el 0.5% y que los óxidos de manganeso no deben exceder el 0.015%, ya que de exceder el límite

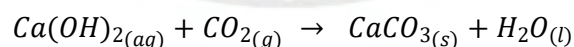
se pueden obtener ciertas características en el cemento que no son estéticamente atractivas, como la presencia de una tonalidad verde en el Clinker por lo cual se debe monitorear de cerca la calidad de los minerales que sirven como materia prima del clinker (Moresová & Škvára, 2001; Thermo Fisher, 2008).

Además, se debe tener en cuenta que aparte de la coexistencia de estos polimorfos, también se pueden encontrar algunas especies que son añadidas como aditivos para mejorar las propiedades del cemento, un ejemplo de aditivo corresponde al yeso, el cual se adiciona al cemento con la finalidad de controlar la deshidratación del mismo durante el proceso de molienda. Debido a todas las especies mencionadas que pueden estar presentes en el cemento, y con sus diferentes fases cristalinas, la interpretación de los picos obtenidos en los espectros de XRD del cemento puede llegar a ser bastante compleja (Thermo Fisher, 2008).

Por otro lado, cuando el cemento ya ha pasado por un proceso de hidratación y de curado, se pueden identificar otras especies como son predominantemente la calcita y la portlandita (hidróxido de calcio), que se generan a partir de la hidratación de la alita, belita y celita. En las siguientes ecuaciones se muestra este proceso de hidratación para el cemento, en el cual la alita y belita en presencia de agua forman gel de silicato de calcio hidratado o CSH como se representa en la química del cemento (Li et al., 2023).



Luego, el hidróxido de calcio sufre procesos de carbonatación cuando entra en contacto con el aire del ambiente, con lo cual se genera la calcita, según la siguiente ecuación.



En la Figura 24 se presenta en difractograma de una muestra de cemento blanco utilizado para la preparación de los morteros. La comparación de picos obtenidos en la muestra con la información de la base de datos del programa nos permitió identificar los componentes presentes en la muestra, en base a lo esperado según la literatura.

Se identificó la presencia de alita (C2S) que se representa como las señales en color rojo, también la presencia de la belita (C3S) en color azul y la presencia de aluminato tricálcico

(C3A) en color fucsia. También se identificaron picos correspondientes a la presencia de dolomita en la muestra, pero en muy baja intensidad, este mineral es adicionado al cemento como aditivo en la mejora de la trabajabilidad de la pasta, así para obtener un incremento en la resistencia a la compresión del concreto final.

Del análisis de las muestras de mortero de cemento estudiadas, se pudo identificar señales de las especies puras utilizadas en su preparación, en diferentes intensidades según el porcentaje de contenido que ocupaban en la composición de cada muestra.

Por ejemplo, el difractograma de la muestra de mortero de cemento blanco sin dióxido de titanio de la Figura 25 mostró señales propias del cuarzo presente en la arena utilizada como agregado fino en el mortero, así como también se identificaron señales propias del cemento hidratado como la calcita, y algunos remanentes de su fase inicial en polvo como la alita, belita y celita, así como también de portlandita, que se genera a partir de la hidratación del cemento.

Sin embargo, la composición mayoritaria de esta muestra es de cuarzo y de calcita, lo cual se puede observar a partir de la intensidad de las señales asociadas a estas especies según la comparación con la base de datos del programa Profex. El resumen de los picos obtenidos para esta muestra se presenta en la Tabla 6.

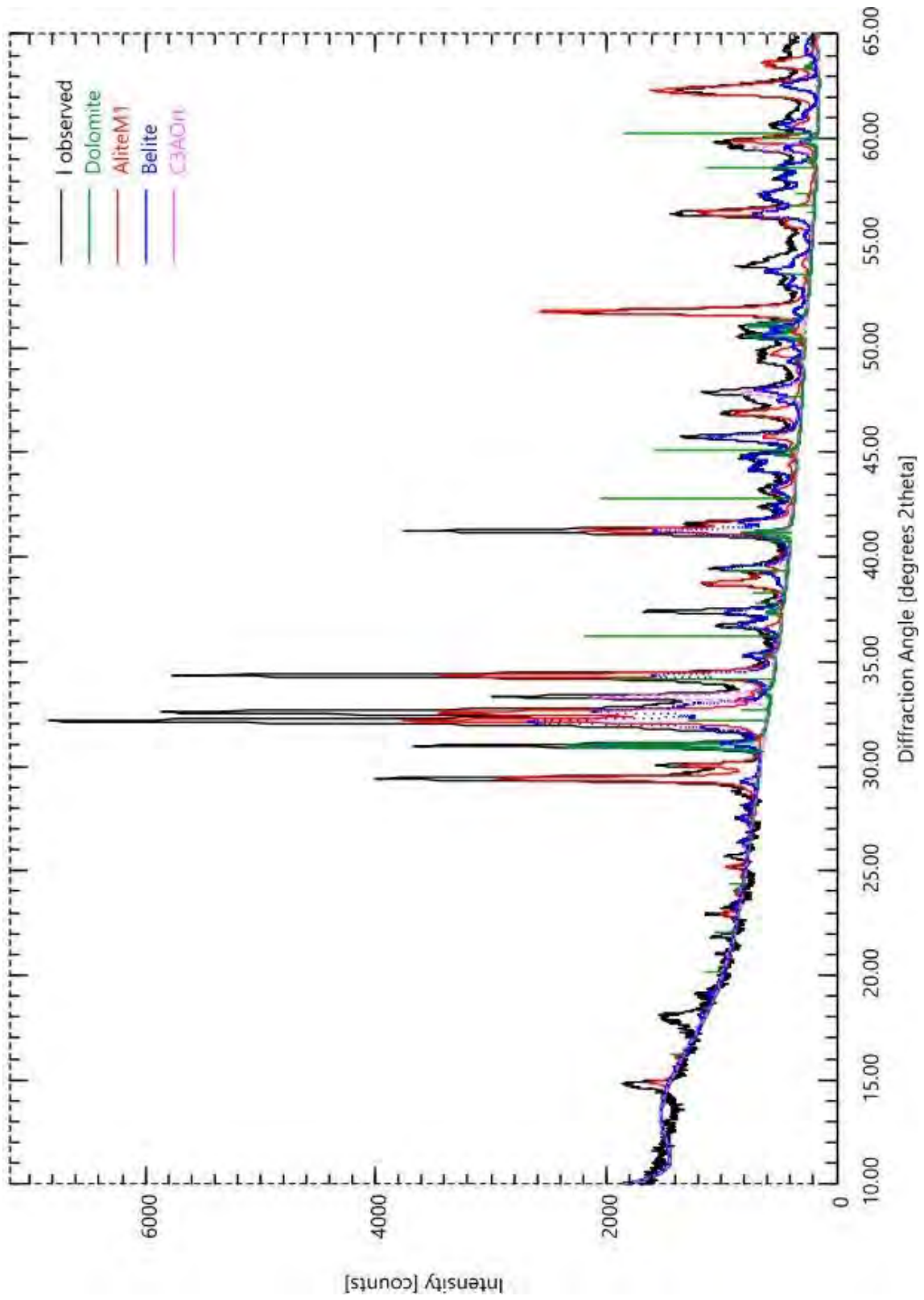


Figura 24. Difractograma de rayos X de la muestra en polvo de cemento puro (Código JCPDS de alita: 49-0442, belita: 33-0302, celita: 35-0755). Autoría propia.

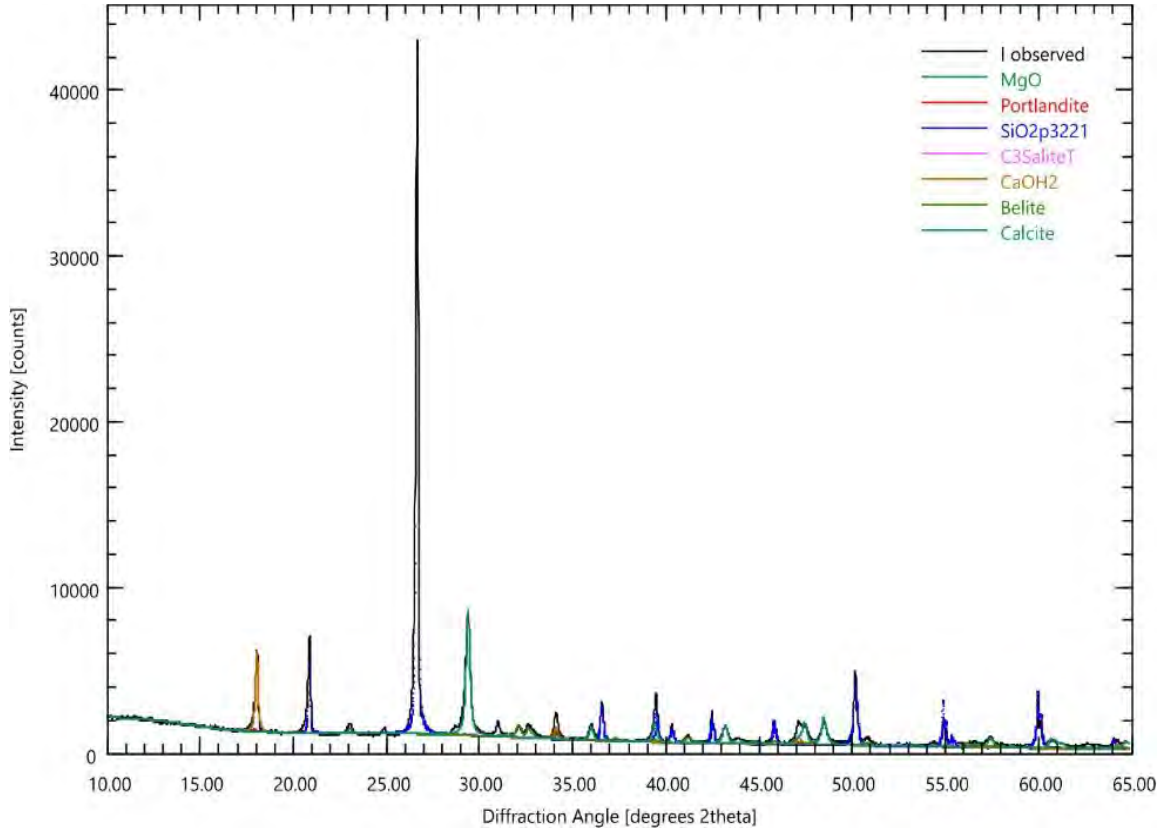


Figura 25. Difractograma de rayos X de la muestra de mortero de cemento puro (Código JCPDS de calcita: 05-0586, portlandita: 44-1481, alita: 49-0442, belita: 33-0302, celita: 35-0755).  
Autoría propia.

La primera especie predominante identificada es el cuarzo (óxido de silicio) con un sistema cristalino hexagonal comparado con la especie N°96-101-1173 de la base de datos, y con las siguientes señales con un  $2\theta$  de:  $20.85^\circ$ ,  $26.64^\circ$ ,  $36.55^\circ$ ,  $40.29^\circ$ ,  $42.45^\circ$ ,  $45.79^\circ$ ,  $50.14^\circ$ ,  $54.88^\circ$ ,  $55.01^\circ$  y  $59.95^\circ$  asociado a los siguientes planos de difracción: (100), (101), (110), (111), (200), (201), (112), (202), (103) y (211).

La segunda especie predominante en la muestra es la calcita, con un sistema cristalino trigonal que se comparó con la especie N° 96-900-9668 de la base de datos, y que presenta las siguientes señales a un ángulo de  $2\theta$ :  $23.03^\circ$ ,  $29.37^\circ$ ,  $30.97^\circ$ ,  $32.10^\circ$ ,  $35.98^\circ$ ,  $39.45^\circ$ ,  $43.17^\circ$ ,  $47.12^\circ$ ,  $47.46^\circ$  y  $48.47^\circ$ , relacionados a los planos de difracción: (102), (104), (006), (110), (113), (204), (108) y (116).

En la Figura 26 se muestra el difractograma detallado con los índices de Miller de los picos más intensos y relevantes asociados a la presencia de estos dos componentes principales en la muestra.

Tabla 6. Resumen de picos e índices de Miller obtenidos del difractograma de mortero de cemento puro.

N° de pico	2 $\theta$	d [Å]	Área del pico	Mineral	Índices de Miller		
					h	k	l
1	20.85	4.26	873.37	Cuarzo	1	0	0
2	23.03	3.8622	155.6	Calcita	1	0	2
3	26.64	3.3457	7603.21	Cuarzo	1	0	1
4	29.37	3.041	2497.41	Calcita	1	0	4
5	30.97	2.8879	227.46	Calcita	0	0	6
6	35.98	2.4961	323.73	Calcita	1	1	0
7	36.55	2.4584	383.64	Cuarzo	1	1	0
8	39.45	2.2841	799.18	Calcita	1	1	3
9	40.29	2.2384	144.04	Cuarzo	1	1	1
10	42.45	2.1294	264.86	Cuarzo	2	0	0
11	43.17	2.0957	421.86	Calcita	2	0	2
12	45.79	1.9814	218.55	Cuarzo	2	0	1
13	47.12	1.9289	597.83	Calcita	2	0	4
14	47.46	1.9156	403.69	Calcita	1	0	8
15	48.47	1.878	553.06	Calcita	1	1	6
16	50.14	1.8196	625.51	Cuarzo	1	1	2
17	54.88	1.6731	190.64	Cuarzo	2	0	2
18	55.01	1.6692	111.67	Cuarzo	1	0	3
19	59.95	1.543	435.66	Cuarzo	2	1	1

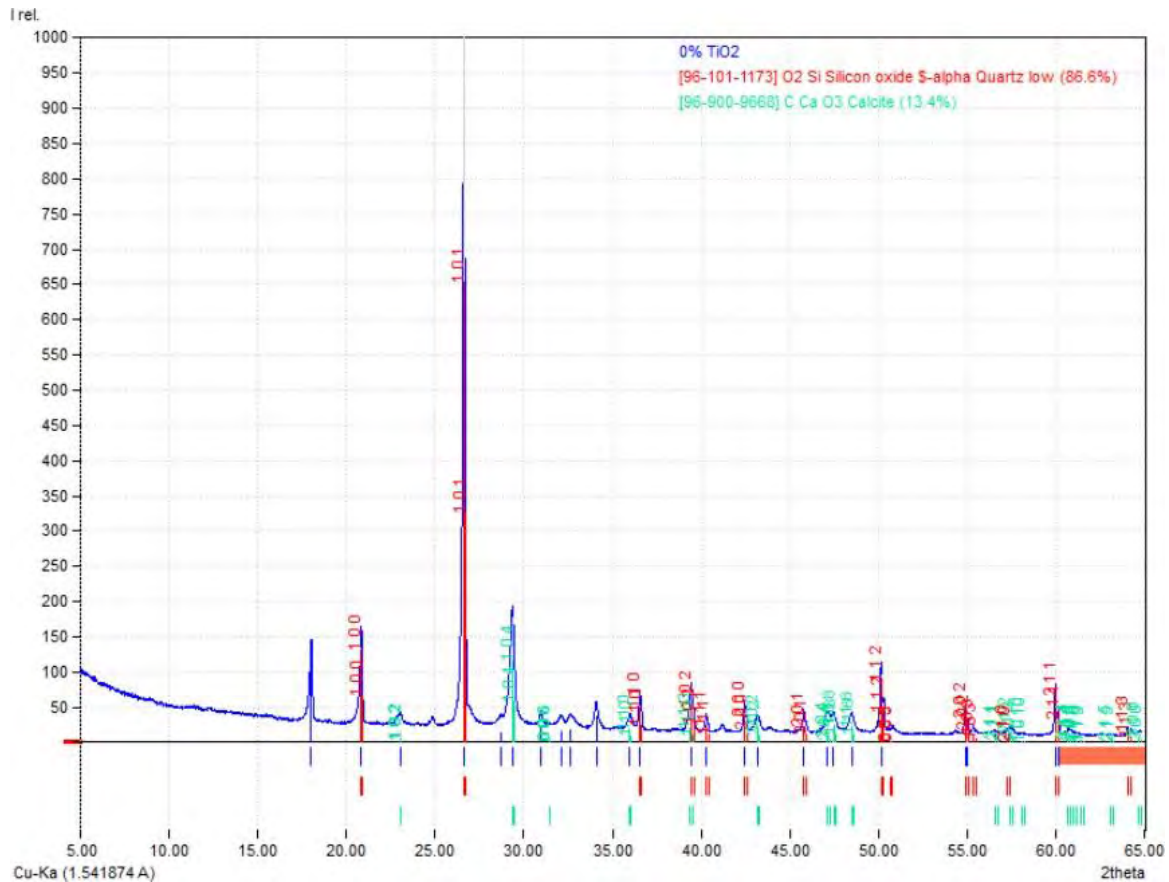


Figura 26. Difractograma de rayos X e índices de Miller de muestra de mortero de cemento sin dióxido de titanio (Código JCPDS de calcita: 05-0586, portlandita: 44-1481, alita: 49-0442, belita: 33-0302, celita: 35-0755). Autoría propia.

Por otro lado, el difractograma de la muestra de mortero de cemento modificado con dióxido de titanio presentó señales características de este semiconductor, además de las señales propias del cemento y cuarzo granulado utilizados para su preparación, similar a los picos obtenidos para la muestra de mortero de cemento sin dióxido de titanio, por lo cual se pudo identificar la presencia de cuarzo, calcita, portlandita, alita, belita y rutilo proveniente del dióxido de titanio.

En la Figura 27 se presenta el difractograma de la muestra de mortero modificada al 10% de dióxido de titanio, donde se observan las señales características de los componentes mencionados previamente.

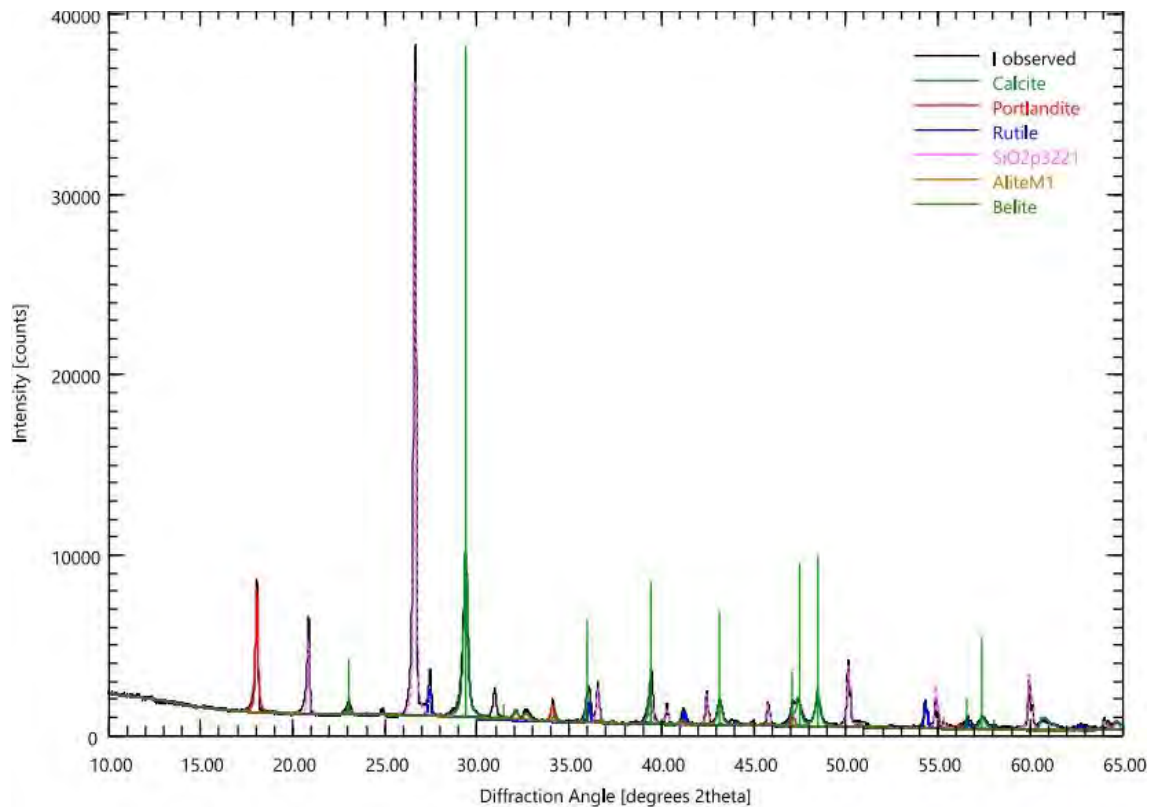


Figura 27. Difractograma de rayos X de la muestra de mortero de cemento con 10% de  $\text{TiO}_2$  (Código JCPDS de calcita: 05-0586, portlandita: 44-1481, alita: 49-0442, belita: 33-0302, celita: 35-0755, rutilo: 21-1276).  
Autoría propia.

Al igual que con el espectro del mortero de cemento puro, se identificaron los picos y planos de difracción asociados a los componentes principales de esta muestra, los cuales corresponden al cuarzo, la calcita y el rutilo del dióxido de titanio, así como también de portlandita (hidróxido de calcio) que se forma a partir de las reacciones de hidratación del cemento.

Las señales obtenidas para el cuarzo, que posee un sistema cristalino trigonal con ejes hexagonales, se ubican en los siguientes ángulos  $2\theta$ :  $20.83^\circ$ ,  $26.62^\circ$ ,  $36.52^\circ$ ,  $39.42^\circ$ ,  $40.26^\circ$ ,  $42.43^\circ$ ,  $45.76^\circ$ ,  $50.10^\circ$ ,  $54.84^\circ$  y  $59.92^\circ$ , relacionado con los siguientes planos de difracción: (100), (101), (110), (102), (111), (200), (201), (112), (202) y (211), respectivamente. Un resumen de estas señales obtenidas se presenta en la Tabla 7

Las señales identificadas para la calcita tienen un ángulo  $2\theta$ :  $23.01^\circ$ ,  $29.35^\circ$ ,  $30.93^\circ$ ,  $43.15^\circ$ ,  $47.42^\circ$  y  $48.45^\circ$ , relacionado con los planos de difracción (102), (104), (006), (202), (106) y (116). Finalmente, se identificaron picos correspondientes a la presencia de rutilo en la muestra, según los siguientes ángulos  $2\theta$ :  $27.42^\circ$ ,  $26.04^\circ$ ,  $41.19^\circ$  y  $54.29^\circ$  con planos

de difracción (110), (101), (111) y (211), respectivamente, como se muestra resumido en la. En la Figura 28 se muestra el difractograma para esta muestra de mortero en donde se identificaron los índices de Miller de las señales principales en el espectro.

*Tabla 7. Resumen de picos e índices de Miller obtenidos del difractograma de mortero de cemento con dióxido de titanio.*

N° de pico	2 $\theta$	d [Å]	Área del pico	Mineral	Índices de Miller		
					h	k	l
1	20.83	4.2642	791.82	Quartz	1	0	0
2	23.01	3.8646	255.81	Calcite	1	0	2
3	26.62	3.3487	7726.97	Quartz	1	0	1
4	27.42	3.2533	641.76	Rutile	1	1	0
5	29.35	3.0431	3152.52	Calcite	1	0	4
6	30.93	2.8914	427.07	Calcite	0	0	6
7	36.04	2.4921	603.79	Rutile	1	0	1
8	36.52	2.4602	411.15	Quartz	1	1	0
9	39.42	2.2856	814.59	Quartz	1	0	2
10	40.26	2.2399	146.68	Quartz	1	1	1
11	41.19	2.1917	213.2	Rutile	1	1	1
12	42.43	2.1304	282.28	Quartz	2	0	0
13	43.15	2.0965	457.93	Calcite	2	0	2
14	45.76	1.9827	197.29	Quartz	2	0	1
15	47.42	1.9173	550.98	Calcite	1	0	8
16	48.45	1.879	674.97	Calcite	1	1	6
17	50.1	1.8209	596.13	Quartz	1	1	2
18	54.29	1.6899	320.46	Rutile	2	1	1
19	54.84	1.6742	213.8	Quartz	2	0	2
20	59.92	1.5437	362.04	Quartz	2	1	1

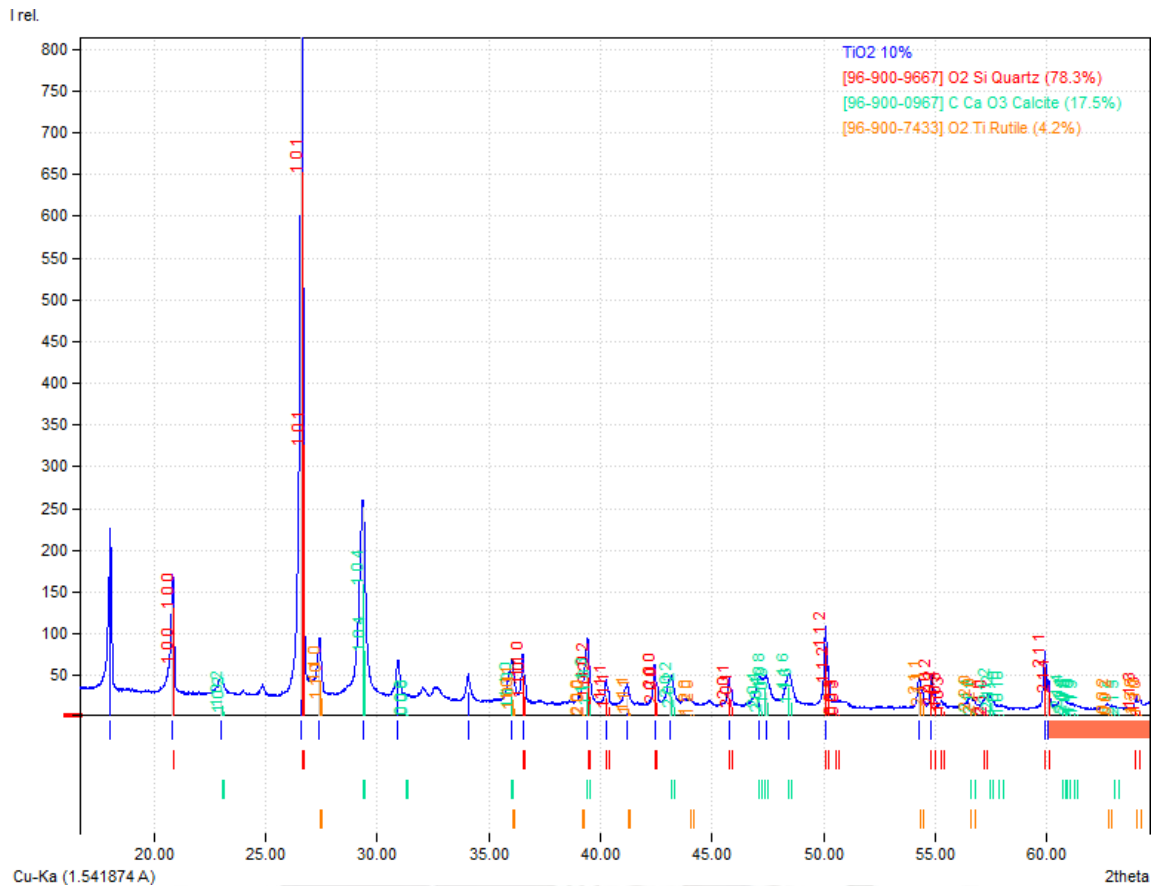


Figura 28. Difractograma de rayos X e índices de Miller de muestra de mortero de cemento con 10% de  $\text{TiO}_2$  (Código JCPDS de calcita: 05-0586, portlandita: 44-1481, alita: 49-0442, belita: 33-0302, celita: 35-0755, rutilo: 21-1276). Autoría propia.

En la Figura 29 se muestra una superposición de los difractogramas obtenidos previamente, donde se incluyen al cemento puro, dióxido de titanio, y las muestras de mortero de cemento a 0% y 10% de dióxido de titanio. En esta imagen se han colocado los rótulos de las principales especies identificadas en cada muestra, para el caso de la curva en verde que corresponde al dióxido de titanio, las señales asociadas se relacionan con la presencia de rutilo.

Se puede identificar también que la curva morada, que corresponde a la muestra de mortero de cemento con 10% de dióxido de titanio, comparte los picos del rutilo, pero con una menor intensidad, mientras que la curva amarilla del mortero de cemento sin dióxido de titanio no exhibe picos asociados al rutilo.

Además de las señales de rutilo, se puede observar que ambas muestras de mortero de cemento exhiben picos bastante similares, que se ubican en las mismas posiciones de

ángulo  $2\theta$ , las cuales corresponden en su mayoría a la presencia de calcita y portlandita que se forman a partir de las reacciones de hidratación del cemento, y también se observan picos asociados al cuarzo, que se relaciona con la arena utilizada como agregado fino en la preparación de los morteros. Se puede ver que la curva roja del cemento puro no exhibe ni las señales del cuarzo ni las de la calcita, y posee un juego diferente y complejo de señales que se asocian a la presencia de alita, belita y aluminosilicatos en su composición inicial, antes del proceso de hidratación.

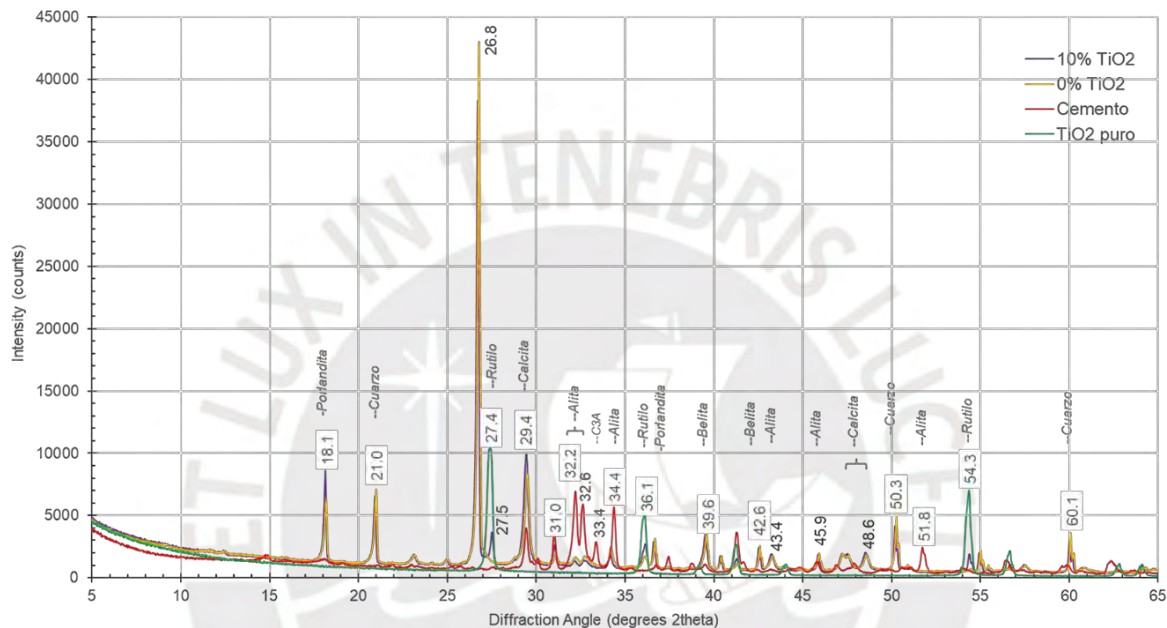


Figura 29. Superposición de difractogramas de cemento puro, dióxido de titanio y morteros de cemento con %0 y 10% de  $\text{TiO}_2$ . Autoría propia.

### 5.5. Estudio de muestras por microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se estudiaron las muestras de dióxido de titanio puro y mortero de cemento con composiciones de 0% y 10% de dióxido de titanio según la metodología explicada en la sección anterior. Las muestras de mortero de cemento fueron analizadas en un microscopio SEM con detector de retrodispersión concéntrica (CBS) de dióxido de titanio, mientras que la muestra de dióxido de titanio puro fue estudiada con un detector de campo grande (LFD) debido a la disponibilidad del equipo en el momento del uso del equipo.

En la Figura 30 se muestra la imagen SEM de la muestra de mortero de cemento con 10% de dióxido de titanio, en esta se puede identificar algunas estructuras típicas en el cemento según la literatura, como son la etringita y las partículas hidratadas como el CSH, la cual se forma a partir de la hidratación de la alita y la belita presentes en el cemento, este

componente se presenta con una estructura amorfa y una baja cristalinidad (Kaewgabkam et al., 2015; Silva et al., 2020).

En la imagen se aprecian unas estructuras a forma de filamentos largos, similares a agujas, los cuales corresponden a la etringita presente en el mortero; por otro lado, se detectan unas aglomeraciones amorfas en ciertas regiones de la imagen, que corresponde a la presencia de silicatos de calcio hidratados (CSH). También se observa la presencia de cavidades huecas o poros en la estructura, lo cual es algo común de obtener en las imágenes SEM de muestras de cemento, sobre todo en la interfase de las estructuras presentes.

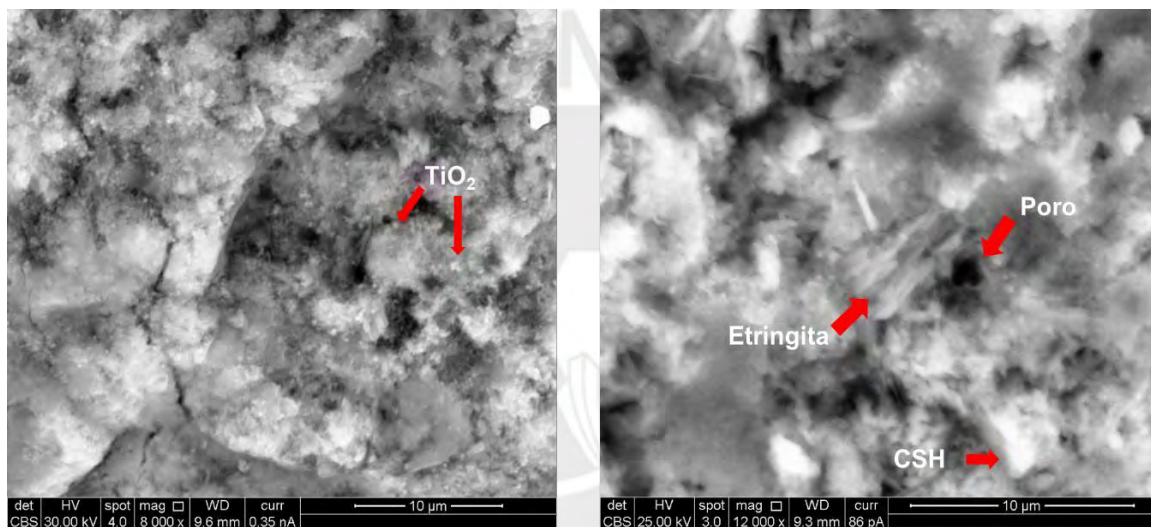


Figura 30. Imagen SEM de una muestra de mortero de cemento con 10% de TiO<sub>2</sub> en diferentes zonas y magnificación distinta (Autoría propia).

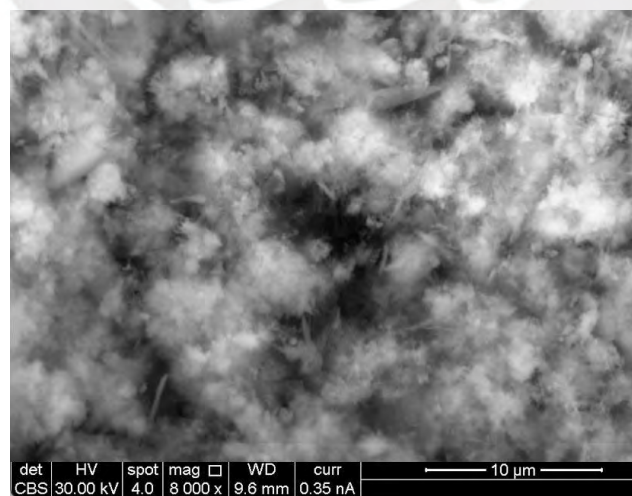


Figura 31. Imagen SEM de una muestra de mortero de cemento con 0% de TiO<sub>2</sub> (Autoría propia).

En el lado izquierdo de la Figura 30 se pueden apreciar unas partículas en forma semicircular y de tamaño pequeño dispersadas a lo largo de la muestra, lo cual corresponde a la presencia de dióxido de titanio, el cual suele presentarse como aglomerados ovalados y con aspecto esponjoso según la literatura sobre muestras de dióxido de titanio del mismo proveedor que el utilizado en este trabajo.

Por otro lado, en la Figura 31 se puede observar la imagen SEM de una muestra de mortero de cemento de control, sin dióxido de titanio. En ella se pueden identificar estructuras similares a las de la Figura 30, como son la presencia de filamentos largos correspondientes a la etringita, y aglomeraciones amorfas que corresponden al CSH. Es también notorio la ausencia de las partículas redondeadas de dióxido de titanio que se visualizaban en la muestra con 10% de reemplazo de este semiconductor.

Es importante mencionar que la estructura que se visualice para este semiconductor en la imagen SEM será diferente dependiendo del tipo de dióxido de titanio que se utilice, en base a su composición, pureza, tamaño de partícula y polimorfo presente.

El análisis de la muestra de dióxido de titanio se realizó con un detector de campo grande (LFD), lo cual no permitió obtener imágenes con una calidad de resolución similares a las de Figura 30, sino un poco menor. En la Figura 32 se muestra la imagen SEM del dióxido de titanio utilizado para la preparación de los morteros de cemento modificados, en ella se puede ver agrupaciones extensas de estructuras con forma semicircular y con una textura esponjosa, lo cual se relaciona con lo reportado por algunos trabajos que utilizan esta técnica para visualizar la morfología de esta especie (Kaewgabkam, 2015; Barone et al., 2014).

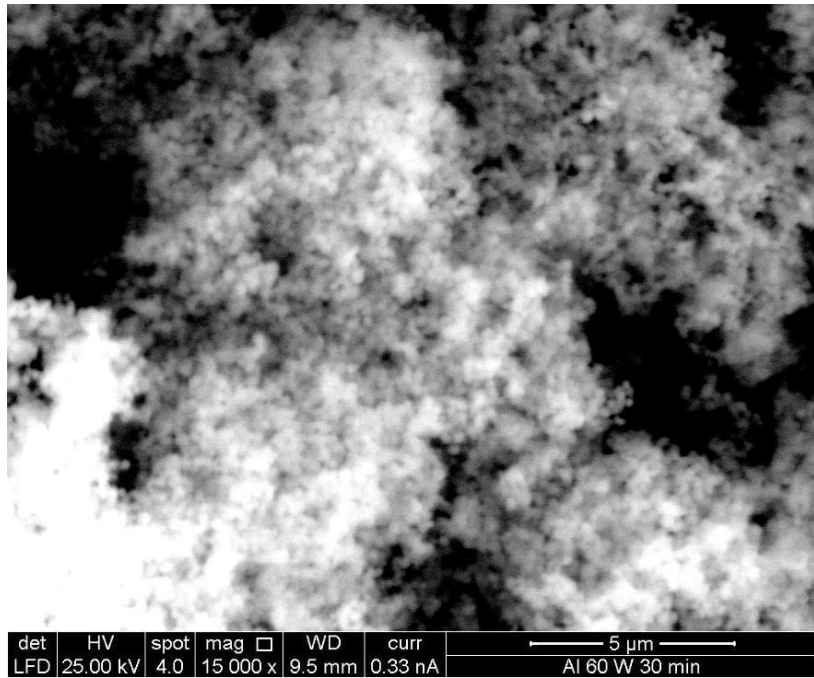


Figura 32. Imagen SEM de la muestra de dióxido de titanio (Autoría propia)

## 6. CONCLUSIONES

A partir del desarrollo de este trabajo, se pueden formular las siguientes conclusiones y recomendaciones.

- El trabajo descrito engloba el estudio de cuatro muestras de mortero, cada uno con un diferente porcentaje de reemplazo de dióxido de titanio en su composición (2.5%, 5%, 7.5% y 10%), además de una muestra de control a base de cemento puro, sin dióxido de titanio. A nivel de propiedades mecánicas se pudo determinar una reducción de la resistencia a la compresión y en la fluidez de la pasta de mortero preparada.
- Para la primera propiedad mecánica, se obtuvo una reducción del 5.5%, 11.5%, 24.9% y 34.8%, respectivamente para las muestras con reemplazo de 2.5%, 5%, 7.5% y 10% en comparación con la resistencia promedio obtenida para la muestra de mortero con 100% de cemento a una edad de 28 días. Esto se debe a que el dióxido de titanio ingresa en reemplazo del cemento, el cual es el componente que confiere la resistencia a la mezcla. Debido a ello, se recomienda optimizar y reducir el porcentaje de reemplazo de dióxido de titanio en los morteros de cemento, como al 2.5%, ya que con esta composición se consiguió un descenso en la resistencia a la compresión de solo 5.5%.
- Para la trabajabilidad de la mezcla, también se detectó una reducción para las muestras de mortero de cemento modificado conforme se incrementó el porcentaje de reemplazo de dióxido de titanio por cemento en la mezcla. El porcentaje de reducción fue de 4%, 6%, 9% y 11% para cada muestra preparada, en comparación a los resultados de flujo medidos para la muestra de mortero de control sin dióxido de titanio, aun así, es importante mencionar que esta reducción en el flujo medido no causó una reducción significativa de la trabajabilidad de las muestras preparadas, ya que estuvieron en un rango de plasticidad que permitió un adecuado trabajo con las mismas. La reducción para la muestra al 2.5% de dióxido de titanio es la menor obtenida, y no dificulta el manejo de la pasta durante su proceso de preparación y moldeo, por lo cual se recomendaría utilizar un nivel de reemplazo mínimo de dióxido de titanio, como 2.5% o máximo al 5% de reemplazo, para minimizar el riesgo de impacto negativo en las propiedades mecánicas.

- La prueba de actividad fotocatalítica que se basó en la norma UNI 11259 permitió determinar que las cuatro formulaciones de mortero de cemento con reemplazo de dióxido de titanio poseen actividad fotocatalítica, incluso para la muestra con menor porcentaje de reemplazo, que fue al 2.5% de dióxido de titanio. Por otro lado, se identificó que la muestra de control con cemento puro no posee actividad fotocatalítica, como se esperaba inicialmente, debido a la ausencia de fotocatalizador en su composición.
- Debido a que el objetivo de este trabajo fue el de desarrollar un material que exhiba un buen efecto catalítico que sea económicamente viable, por lo cual esta propiedad es la de mayor importancia. La fluidez es relevante para la puesta en obra de un material cementicio, pero esta propiedad se puede modificar con la adición de agentes dispersantes para concreto o cemento, incluso en concentraciones tan bajas como al 0.01%, lo cual no debe interferir en las propiedades fotocatalíticas del mortero. Para el caso de la resistencia a la compresión, debido a que el material final está concebido para aplicaciones como recubrimientos exteriores, debe tener una resistencia suficiente para resistir procesos de tarrajeo, mas no a grados tan exigentes como los materiales destinados para aplicaciones estructurales.
- Es importante mencionar que las muestras con mayor concentración de dióxido de titanio no exhiben una mayor actividad fotocatalítica, ya que poseen valores de R4 y R24 similares al de la muestra de reemplazo de 5% de  $\text{TiO}_2$ , por otro lado, la diferencia entre los valores de R24 entre el mortero de control y el de 2.5% difieren en un 86% lo cual se debe a la baja degradación de la rodamina en la muestra de control, por lo que el color del pigmento se mantuvo casi intacto luego de que esta muestra fue irradiada con luz ultravioleta. La diferencia entre el R24 de las muestras al 2.5% y 5% de dióxido de titanio es solo de 6%, debido a ello se recomienda utilizar la formulación al 2.5% de mortero de cemento que posee una buena actividad fotocatalítica, y que requiere menos fotocatalizador en su preparación.
- La caracterización colorimétrica de las muestras durante el estudio de actividad fotocatalítica resultó de bastante utilidad para poder identificar y clasificar la variación del color entre las muestras antes y después de la exposición a luz ultravioleta. En las gráficas de color de los grupos de mediciones se pudo identificar la mayor variación y desplazamiento hacia el blanco de las muestras de mortero con reemplazo de

dióxido de titanio, mientras que la muestra de control con cemento puro no exhibió un cambio considerable en color luego de la exposición a luz UV.

- De este modo, este trabajo permite concluir que los materiales cementicios que son modificados con dióxido de titanio en cantidades de hasta 10% de reemplazo del cemento, poseen buenas propiedades fotocatalíticas antes contaminantes orgánicos, como fue demostrado en la prueba de actividad fotocatalítica con rodamina. Además, se pudo determinar que los morteros modificados exhiben un cambio en sus propiedades mecánicas dependiendo del porcentaje de reemplazo de dióxido de titanio en su composición.



## 7. RECOMENDACIONES

- Para el desarrollo de materiales cementicio con actividad fotocatalítica, se recomienda utilizar materiales con un porcentaje de reemplazo de dióxido de titanio similar a un 2.5%, ya que a esta concentración se puede obtener un equilibrio entre una buena actividad fotocatalítica y una mínima variación en las propiedades mecánicas, además de que esta solución implica una mejor relación costo/beneficio ya que requiere la menor cantidad de dióxido de titanio en su composición, el cual es un componente que se encuentra comercialmente a un precio mayor que el del cemento.
- Se recomienda que si se desea realizar un estudio más profundo de la morfología de los materiales cementicios modificados con fotocatalizadores, se puede desarrollar un estudio por microscopía SEM en un equipo que cuente con un detector de retrodispersión concéntrica (CBS) par obtener imágenes de mejor resolución en las demás muestras de morteros de cementos preparadas.
- Además, se recomienda realizar un estudio microscopía SEM con un mapeo de EDS para analizar la composición elemental de los materiales presentes mediante un mapa de distribución de los componentes en la mezcla del mortero.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abella Rodríguez, Gonzalo (2015). *Mejora de las propiedades de materiales a base de cemento que contienen TiO<sub>2</sub>: propiedades autolimpiantes*. Tesis (Master), E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM).

Andaloro, A. & Mazzucchelli, E. & Lucchini, A. (2016). Photocatalytic self-cleaning coatings for building façade maintenance. Performance analysis through a case-study application.. *Journal of Facade Design and Engineering*. 4. 10.7480/jfde.2016.4-3.1148.

Ansari, M.A., Shariq, M., Ansari, S.S., et al. (2024). *Efficiency assessment of TiO<sub>2</sub>-based photocatalytic concrete for clean and sustainable construction: A state-of-the-art review*. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 48(6), 3871–3898. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01415-8>

ASTM. (2020). *Standard test method for flow of hydraulic cement mortar (ASTM C1437-20)*. ASTM. <https://doi.org/10.1520/C1437-20>

ASTM. (2024). *Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates (ASTM C125-24)*. ASTM. <https://doi.org/10.1520/C0125-24>

ASTM. (2024). *Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 50 mm [2 in.] cube specimens) (ASTM C109M-24)*. <https://doi.org/10.1520/C0109M-24>

Barone, P., Stranges, F., Barberio, M., Renzelli, D., Bonanno, A., & Xu, F. (2014). Study of band gap of silver nanoparticles-titanium dioxide nanocomposites. *Journal of Chemistry*, 2014, Article 589707. <https://doi.org/10.1155/2014/589707>

Benoit-Marquié, F., Wilkenhöner, U., Simon, V., Braun, A. M., Oliveros, E., & Maurette, M.-T. (2000). *VOC photodegradation at the gas–solid interface of a TiO<sub>2</sub> photocatalyst: Part I: 1-butanol and 1-butylamine*. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 132(3), 225–232. [https://doi.org/10.1016/S1010-6030\(00\)00196-9](https://doi.org/10.1016/S1010-6030(00)00196-9)

Binas, V., Venieri, D., Kotzias, D., & Kiriakidis, G. (2017). *Modified TiO<sub>2</sub> based photocatalysts for improved air and health quality*. *Journal of Materiomics*, 3(1), 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2016.11.002>

Calvo, D., Molina, M. T., & Salvachúa, J. (2016). *Ciencias de la Tierra y del Medioambiente. Bloque IV, Unidad 10*. Editorial McGraw-Hill.

Casagrande, C. A., Jochem, L. F., Repette, W. L., & Hotza, D. (2020). Evaluation of nano-TiO<sub>2</sub> on properties of cementitious mortars. *Revista Materia*, 25(4), 1–15. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1183>

Cassar, L. (2004). Photocatalysis of cementitious materials: Clean buildings and clean air. *MRS Bulletin*, 29(5), 328–331. <https://doi.org/10.1557/mrs2004.99>

Cernecký, J., Valentová, K., Pivarciová, E., & Božek, P. (2015). Ionization impact on the air cleaning efficiency in the interior. *Measurement Science Review*, 15, 156-166. <https://doi.org/10.1515/msr-2015-0023>

Certified Material Testing Products. (2024). *Photocatalytic concrete: A solution for pollution*. Certified MTP. Consulta: 03 de enero de 2025. Acceso en: <https://blog.certifiedmtp.com/photocatalytic-concrete-a-solution-for-pollution>

Dantas, S. R. A., Lima, F. J. N. de, Romano, R. C. de O., Pileggi, R. G., & Loh, K. (2021). Evaluation of rheological properties of mortar with TiO<sub>2</sub> addition. *Ambiente Construído*, 21( 4), 7-21. doi:10.1590/s1678-86212021000400556

Dell'Edera, M., lo Porto, C., de Pasquale, I., Petronella, F., Curri, M. L., Agostiano, A., & Comparelli, R. (2021). Photocatalytic TiO<sub>2</sub>-based coatings for environmental applications. *Catalysis Today*, 380, 62–83. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2021.04.023>

Döndüren, M. S., & Al-Hagri, M. G. (2022). A review of the effect and optimization of the use of nano-TiO<sub>2</sub> in cementitious composites. *Research on Engineering Structures and Materials*, 8(2), 283–305. <https://doi.org/10.17515/resm2022.348st1005>

Envira. (2022). Contaminantes primarios y secundarios: estos son los más peligrosos. Envira. Consultado en: 22 de setiembre de 2024. Recuperado de: <https://envira.es/contaminantes-primarios-y-secundarios-mas-peligrosos>

Five Star Products. Testing for Compressive Strength ASTM C109 (Cubes) & ASTM C39 (Cylinders). Technical Bulletin 143. Consultado en: 14 de enero de 2025. Recuperado de: <https://www.buildsite.com/pdf/fivestarproducts/Five-Star-TECHNICAL-BULLETIN-143-Testing-for-Compressive-Strength-1980058.pdf>

Folli, A., Pade, C., Hansen, T. B., De Marco, T., & Macphee, D. E. (2012). TiO<sub>2</sub> photocatalysis in cementitious systems: Insights into self-cleaning and depollution chemistry. *Cement and Concrete Research*, 42(3), 539-548. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.001>

Godbert, N., Mastropietro, T., & Poerio, T. (2018). *Mesoporous TiO<sub>2</sub> thin films: State of the art*. In *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74244>

Gopalan, A. I., Lee, J. C., Saianand, G., Lee, K. P., Sonar, P., Dharmarajan, R., Hou, Y. L., Ann, K. Y., Kannan, V., & Kim, W. J. (2020). Recent progress in the abatement of hazardous pollutants using photocatalytic TiO<sub>2</sub>-based building materials. *Nanomaterials*, 10(9), 1–50. <https://doi.org/10.3390/nano10091854>

Guillermo Sanchez, G. J., & Inocencio Otrera, P. I. (2022). *Propuesta de uso de la fotocatalisis de dióxido de titanio en morteros como agente descontaminante en el distrito de Lima*.

Haggerty, J.E.S., Schelhas, L.T., Kitchaev, D.A. *et al*. High-fraction brookite films from amorphous precursors. *Sci Rep* 7, 15232 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15364-y>

Haider, A., Jameel, Z., & Al-Hussaini, I. (2019). *Review on: Titanium dioxide applications*. *Energy Procedia*, 157, 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.159>

Hashimoto, K., Irie, H., & Fujishima, A. (2005). *TiO<sub>2</sub> photocatalysis: A historical overview and future prospects*. *Japanese Journal of Applied Physics*, 44(12R), 8269. <https://doi.org/10.1143/JJAP.44.8269>

He, F., Jeon, W., & Choi, W. (2021). Photocatalytic air purification mimicking the self-cleaning process of the atmosphere. In *Nature Communications* (Vol. 12, Issue 1). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22839-0>

Hernández-Rodríguez, M. J., Rodríguez, R. S., Darias, R., Díaz, O. G., Luzardo, J. M. P., Rodríguez, J. M. D., & Melián, E. P. (2019). Effect of TiO<sub>2</sub> addition on mortars: Characterization and photoactivity. *Applied Sciences* (Switzerland), 9(13). <https://doi.org/10.3390/app9132598>

Hernández, M., Pulido, E., González, O., Araña, J., Macías, M., González, A., & Doña, J. (2016). Comparison of supported TiO<sub>2</sub> catalysts in the photocatalytic degradation of NO<sub>x</sub>. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 413, 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.molcata.2015.12.007>

Hossain, S., Ahmed, S. Easy and green synthesis of TiO<sub>2</sub> (Anatase and Rutile): Estimation of crystallite size using Scherrer equation, Williamson-Hall plot, Monshi-Scherrer Model, size-strain plot, Halder- Wagner Model, *Results in Materials*, Volume 20, 2023, ISSN 2590-048X, <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100492>.

IHME, Global Burden of Disease (2024) – with minor processing by Our World in Data. “High blood pressure”, “Global Burden of Disease - Risk Factors”. Acceso en: <https://ourworldindata.org/grapher/number-of-deaths-by-risk-factor>.

Inocencio, P., & Guillermo, G. (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. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). <http://hdl.handle.net/10757/667517>

International Organization for Standardization (2008). *Colorimetry-Part 4: CIE 1976 L\*a\*b Colour Space (ISO 11664-4)*. Recuperado de: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:11664:-4:ed-1:v1:en>. Consulta: 18 de diciembre de 2024.

Janus, M., Mađraszewski, S., Zajac, K., & Kusiak-Nejman, E. (2020). A new preparation method of cement with photocatalytic activity. *Materials*, 13(23), 1–12. <https://doi.org/10.3390/ma13235540>

Javed, R., Ain, N. ul, Gul, A., Arslan Ahmad, M., Guo, W., Ao, Q., & Tian, S. (2022). Diverse biotechnological applications of multifunctional titanium dioxide nanoparticles: An up-to-date review. *IET Nanobiotechnology*, 16(5), 171–189. <https://doi.org/10.1049/nbt2.12085>

Jędrzejczak, P., Parus, A., Balicki, S. & Kornaus, K., Janczarek, M., Wilk, K., Jesionowski, T., & Ślosarczyk, A., Kłapiszewski, Ł. (2022). The influence of various forms of titanium dioxide on the performance of resultant cement composites with photocatalytic and antibacterial functions. *Materials Research Bulletin*. 160. 112139. [10.1016/j.materresbull.2022.112139](https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2022.112139).

Jin, Q., Saad, E. M., Zhang, W., Tang, Y., & Kurtis, K. E. (2019). *Quantification of NO<sub>x</sub> uptake in plain and TiO<sub>2</sub>-doped cementitious materials*. *Cement and Concrete Research*, 122, 251–256. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.010>

Kadhim, M. J., Al-Jadiri, R. S., & Wahab Ali, M. A. al. (2019). Study the effect of addition of nano-TiO<sub>2</sub> by dispersion method on some mechanical properties and durability of cement mortar. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 518(3), 032027. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/518/3/032027>

Kaewgabkam, N., Jaitanong, N., & Narksitipan, S. (2015). Preparation and characterization of cement-TiO<sub>2</sub> composites. *Applied Mechanics and Materials*, 804, 133–136. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.804.133>

Kim, S. Y., Zhao, S., Jung, D., Cha, B. J., Saqlain, S., Choe, H., Hwang, C.-C., & Kim, Y. D. (2021). Visible light responsive rutile TiO<sub>2</sub> photocatalysts mixed with cement: Enhancement effect driven by TiO<sub>2</sub>/cement interfaces. *Applied Surface Science*, 570, 151136. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151136>

Li, X., Grassl, H., Hesse, C. *et al.* Unlocking the potential of ordinary Portland cement with hydration control additive enabling low-carbon building materials. *Commun Mater* 5, 1 (2024). <https://doi.org/10.1038/s43246-023-00441-9>

Ma, B., Li, H., Mei, J., Li, X., & Chen, F. (2015). *Effects of nano-TiO<sub>2</sub> on the toughness and durability of cement-based material*. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 583106. <https://doi.org/10.1155/2015/583106>

Mamaghani, A., Haghghat, F., & Lee, C.-S. (2017). Photocatalytic oxidation technology for indoor environment air purification: The state-of-the-art. *Applied Catalysis B: Environmental*, 203, 247–269. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.10.037>

Martínez Zuasnábar, K. R. (2019). *Efecto del dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) en el comportamiento del mortero de cemento Portland tipo I para fachadas*. Universidad Ricardo Palma. Lima, Perú

Matsunaga, T., Tomoda, R., Nakajima, T., & Wake, H. (1985). Photoelectrochemical sterilization of microbial cells by semiconductor powders (Sterilization; semiconductor; *Saccharomyces cerevisiae*; coenzyme A). *FEMS Microbiology Letters*, 29. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1985.tb00864.x>

Medvids, A., Onufrijevs, P., Kaupužs, J., Eglitis, R., Padgurskas, J., Zunda, A., Mimura, H., Skadins, I., & Varnagiris, S. (2021). Anatase or rutile TiO<sub>2</sub> nanolayer formation on Ti substrates by laser radiation: Mechanical, photocatalytic and antibacterial properties.

*Optics and Laser Technology*, 138, 106898.  
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106898>

Molina, J & Rangel, L. (2020). Efecto de la adición de dióxido de titanio en las propiedades mecánicas y de durabilidad en materiales a base de cemento. Consulta en: 05 de marzo de 2021. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10983/24943>

Moresová, K., & Škvára, F. (2001). White cement - Properties, manufacture, prospects. *Ceramics - Silikty*, 45(4), 158–163.  
[https://www2.irms.cas.cz/materialy/cs\\_content/2001/Moresova\\_CS\\_2001\\_0000.pdf](https://www2.irms.cas.cz/materialy/cs_content/2001/Moresova_CS_2001_0000.pdf)

Muniz, F. T. L., Miranda, M. A. R., Morilla dos Santos, C. & Sasaki, J. M. (2016). *Acta Cryst.* A72, 385-390. <https://doi.org/10.1107/S205327331600365X>

Nath, R. K., Zain, M. F. M., & Jamil, M. (2016). An environment-friendly solution for indoor air purification by using renewable photocatalysts in concrete: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1184–1194.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.018>

Narendran, N., Deng, L., Freyssinier, J. P., Yu, H., Gu, Y., Cyr, D., & Taylor, J. (2004). *Developing color tolerance criteria for white LEDs*. Lighting Research Center.  
<https://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/pdf/colordiscriminationstudy.pdf>

Navarrete, S. y Peñafiel, F. (2019). Estudio de las características del fotocatalizador dióxido de titanio en hormigones, según la norma UNI 11259. Quito: UCE. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/20195>

Navarrete Angulo, S. M., & Peñafiel Carpio, F. J. (2019). *Estudio de las características del fotocatalizador dióxido de titanio en hormigones, según la norma UNI 11259*. Acceso en: <https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/72defa5e-6426-4a2d-aec2-a846869cdfdd>

Nazari, A., Riahi, S., Riahi, S., Shamekhi, F., & Khademno, A. (2010). Assessment of the effects of the cement paste composite in presence of TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Journal of American Science*, 6(4).

Padmanabhan, N. T., & John, H. (2020). Titanium dioxide based self-cleaning smart surfaces: A short review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104211.  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104211>

Roy, A. (2019). A review of general and modern methods of air purification. *Journal of Thermal Engineering*, 5(2), 22-28. <https://doi.org/10.18186/thermal.529054>

Sakar, M., Mithun Prakash, R., & Do, T.-O. (2019). Insights into the TiO<sub>2</sub>-Based Photocatalytic Systems and Their Mechanisms. *Catalysts*, 9(8), 680.  
<https://doi.org/10.3390/catal9080680>

Schutte-Smith, M., Erasmus, E., Mogale, R., et al. (2023). Using visible light to activate antiviral and antimicrobial properties of TiO<sub>2</sub> nanoparticles in paints and coatings: Focus

on new developments for frequent-touch surfaces in hospitals. *Journal of Coatings Technology and Research*, 20(6), 789–817. <https://doi.org/10.1007/s11998-022-00733-8>

Silva, L. A., Nahime, B. O., Lima, E. C., Akasaki, J. L., & Reis, I. C. (2020). XRD investigation of cement pastes incorporating concrete floor polishing waste. *Ceramica*, 66(380), 373–378. <https://doi.org/10.1590/0366-69132020663802956>

Sylvania-Osram (2000). MacAdam Ellipses. What are MacAdam Ellipses or color ovals?. Consulta: 15 de marzo de 2025. Acceso en: [https://www.usalighting.com/stuff/contentmgr/files/1/f386756b8bcf5da65a8d3c26a56b82e7/misc/macadam\\_faqs.pdf](https://www.usalighting.com/stuff/contentmgr/files/1/f386756b8bcf5da65a8d3c26a56b82e7/misc/macadam_faqs.pdf)

Thermo Fisher Scientific (2008). Identification and Quantification of Cement Phases by X-Ray Diffraction (Application Note: 41802). Acceso: 08 de diciembre de 2024, Recuperado de la página web de Thermo Fisher Scientific: <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/CAD/Application-Notes/Identification-Quantification-Cement-Phases.pdf>

UNI. (2016). *UNI 11259:2016 - Determinazione dell'attività fotocatalitica di leganti idraulici - Metodo della rodamina*. Acceso en: <https://store.uni.com/uni-11259-2016>

Weon, S., He, F., & Choi, W. (2019). Status and challenges in photocatalytic nanotechnology for cleaning air polluted with volatile organic compounds: Visible light utilization and catalyst deactivation. *Environmental Science: Nano*, 6(11), 3185–3214. <https://doi.org/10.1039/c9en00891h>

Westerhoff, P., Song, G., Hristovski, K., & Kiser, M. A. (2011). *Occurrence and removal of titanium at full scale wastewater treatment plants: Implications for TiO<sub>2</sub> nanomaterials*. *Journal of Environmental Monitoring*, 13(5), 1195–1203. <https://doi.org/10.1039/C1EM10017C>

Wu, M., & Liu, K. (2020). *Air purification in confined spaces*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 446, 032072. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/446/3/032072>

## 9. ANEXOS

### 9.1. Proceso de llenado de moldes según norma ASTM C109

Se debe comenzar el proceso de moldeo como máximo dentro de los dos minutos y medio transcurridos desde el término del último paso de mezclado del mortero. Se coloca mezcla hasta la mitad de capacidad de cada molde.



Figura 33. Proceso de adición de mezcla en moldes (Autoría propia)

Luego se debe realizar un proceso de compactación mediante la aplicación de golpes con un tamper, a una frecuencia de 32 impactos suaves en un lapso de 10 segundos, divididas en cuatro rondas (8 golpes en cada una), y alternando la dirección entre cada ronda, según se puede apreciar en la siguiente figura. Se debe completar este proceso de compactación para un cubo antes de continuar al siguiente.

### Proceso de "tampering" durante el moldeado

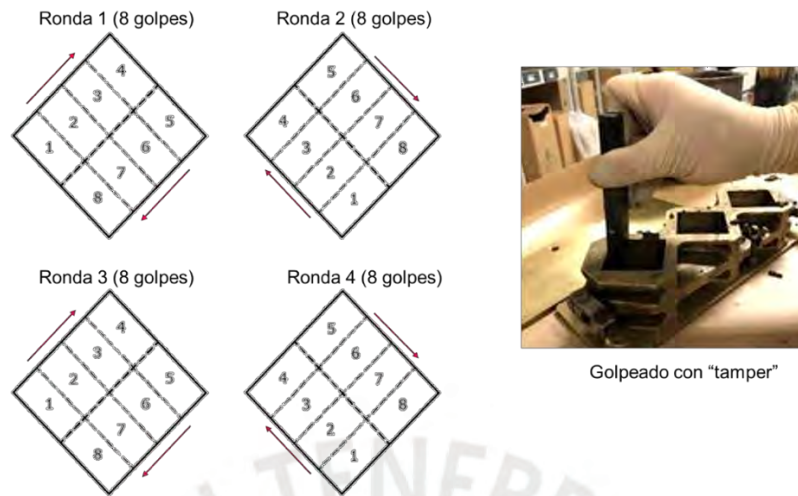


Figura 34. Proceso de tampering durante el llenado de molde. Recuperado de Five Star Products. Testing for Compressive Strength ASTM C109 (Cubes) & ASTM C39 (Cylinders). Technical Bulletin 143. [Licencia CC BY-NC-ND 4.0](#)

Al finalizar la compactación de la primera capa en todos los moldes, se llenan con un pequeño exceso de mezcla de mortero y se realiza una segunda etapa de compactación, siguiendo un patrón similar al utilizado en la primera ronda. La mezcla que se encuentra fuera del molde se lleva hacia el centro del envase con ayuda de los dedos para asegurar que los moldes queden completamente llenos de mezcla y con una pequeña cantidad rebosando del límite superior del molde. Finalmente, se retira el exceso de mortero de cada molde mediante el alisado de esta superficie con una espátula de metal, y se limpian los restos de mezcla del molde con un paño de tela húmedo.