



UNIVERSIDAD MICHOCANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



Facultad de Ingeniería Civil

Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental

TESIS PROFESIONAL:

**“PASTAS CEMENTO-AGUA CON NANOPARTÍCULAS DE
DIÓXIDO DE TITANIO (TiO_2) DOPADAS CON PLATA (Ag) PARA LA
DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES Y LA INHIBICIÓN DE
MICROORGANISMOS”**

Que para obtener el título de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA:

Ing. Deivy David Gómez Rodríguez

Asesor:

Dr. Hugo Luis Chávez García

Co-asesor

Dr. Jorge Alberto Borrego Pérez



Morelia, Michoacán, México, octubre de 2025

ÍNDICE

Contenido

ÍNDICE	i
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	ix
GLOSARIO DE ABREVIATURAS	ix
Agradecimientos.....	x
Dedicatorias.....	xii
I.-RESUMEN	xii
II.-ABSTRACT	xiii
III.-JUSTIFICACIÓN	xiv
IV.-OBJETIVO GENERAL	xv
V.-OBJETIVOS PARTICULARES	xv
VI.-HIPÓTESIS.....	xv
1.-INTRODUCCIÓN	1
2.-ANTECEDENTES	2
3.-MARCO TEÓRICO.....	3
3.1.-Cemento	3
3.1.1.-Manufactura del cemento portland.....	4
3.1.2.-Composicion química	5
3.1.3.-Hidratación del cemento.....	6
3.1.4.-Fraguado del cemento.	6
3.1.5.-Calor de hidratación del cemento.....	7
3.1.6.-Mezclas con cemento.....	7
3.2.-Diseño de pastas cemento-agua.	8
3.2.1.-Diseño según el ACI.....	8

3.3.-Pruebas a especímenes de pastas cemento-agua	13
3.3.1.-Resistividad eléctrica	13
3.3.2.-Velocidad de Pulso Ultrasónico	15
3.4.-Innovaciones en las propiedades del cemento.	17
3.4.1.-Nanomateriales	18
3.4.2.-Tipos de nanomateriales	19
3.5.-Nanopartículas.....	21
3.5.1.-Creación de nanopartículas	21
3.5.2.-Metodo Sol-Gel	22
3.5.3.-Dopaje.....	22
3.5.4.-Dióxido de titanio.....	23
3.6.-Fotocatálisis.....	27
3.7.-Contaminantes genéricos	28
3.7.1.-Azul de metileno.....	29
3.7.2.-Azul ácido 9.....	29
3.8.-Microorganismos a usar Escherichia coli de referencia ATCC 25922	29
3.8.1.-Agar.....	30
3.8.2.-Caldo Mueller-Hinton.....	30
3.8.3.-Sembrado masivo en cajas de Petri con agar	30
3.8.4.-Halo de inhibición.....	31
4.-DESARROLLO EXPERIMENTAL	31
4.1.-Elaboración de las nanopartículas de TiO ₂	31
4.1.1.-Reactivos	31
4.1.2.-Instrumental	31
4.1.3.-Procedimiento	32
4.2.-Dopaje con Ag	32

4.3.-Elaboración de especímenes de pasta cemento-agua con nanopartículas de TiO_2 dopadas con Ag	33
4.3.1.-Cemento.....	33
4.3.2.-Agua.....	33
4.3.3.-Diseño de pastas de cemento	33
4.3.4.-Equipo empleado para la elaboración de pastas	34
4.3.5.-Producción de cubos de 2.5 cm de pastas cemento-agua adicionadas con nanopartículas de TiO_2 dopadas con Ag.....	34
4.3.6.-Obtención de discos de pasta cemento-agua con nanopartículas de TiO_2 :4%Ag mediante mecanización en dos etapas, obtención de cilindro y seccionado transversal	36
4.3.7.-Elaboración de placas de pasta cemento-agua con nanopartículas de TiO_2 :4%Ag mediante mecanización.....	36
4.3.8.-Elaboración de esquirlas de pasta cemento-agua con nanopartículas de TiO_2 :4%Ag mediante mecanización.	37
4.4.-Pruebas de inhibición de microorganismos, usando E. coli.....	37
4.4.1.-Comprobación de la capacidad de inhibición de las nanopartículas de TiO_2 :4%Ag.	37
4.4.2.-Prueba de inocuidad de los discos de cemento-agua con nanopartículas de TiO_2 :4%Ag.....	38
4.4.3.-Pruebas de la contribución independiente de la Ag en las nanopartículas de TiO_2 :4%Ag para la inhibición de microorganismos en el laboratorio.	39
4.4.4.-Pruebas de reacciones fotocatalíticas para la inhibición de microorganismos en el laboratorio.	41
4.5.-Pruebas de degradación de contaminantes usando AM y AA9	42
4.5.1.-Reactor para pruebas de reacciones fotocatalíticas de las nanopartículas de TiO_2 :4%Ag.....	42
4.5.2.-Curva de calibración para los contaminantes genéricos	44

4.5.3.-Comprobación de la capacidad de degradación de contaminantes de las nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$	46
4.5.4.-Pruebas de reacciones fotocatalíticas para la degradación de contaminantes en el laboratorio	47
5.-ANÁLISIS DE RESULTADOS	48
5.1.-Resultados del DRX	48
5.1.1.-Primer resultado del DRX.....	48
5.1.2.-Segundo resultado del DRX.....	50
5.2.-Resultados de VPU	52
5.3.-Resultados de inhibición de la E. Coli Ref.	53
5.3.1.-Comprobación de la capacidad fotocatalítica de las nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$. Contra el E. Coli	53
5.3.2.-Resultados de la prueba de inocuidad de los de los discos de cemento-agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$	54
5.3.3.-Resultados de contribución independiente de la Ag en las nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ para la inhibición de microorganismos en el laboratorio.	55
5.3.4.-Resultados pruebas de inhibición E. Coli	56
5.4.-Resultados de la degradación del AM y AA9.....	57
5.4.1.-Comprobación de la degradación del AM y El AA9 con las nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$	57
5.4.2.-Comprobación de la degradación del AM con las esquirlas con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$	61
5.4.3.-Comprobación de la degradación del AA9 con las esquirlas con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$	63
5.4.4.-Resultados de la degradación del AM y AA9 en placas de pasta cemento-agua con $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$	69
6.-CONCLUSIONES.....	70
7.-RECOMENDACIONES	72

8.-DOCUMENTACIÓN CONSULTADA.....	73
----------------------------------	----

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Cubos de 2.5 cm (Autoría propia).	2
Ilustración 2: Isla de Portland, Dorset, Inglaterra, Reino Unido [6].	4
Ilustración 3: Representación esquemática de la fabricación del cemento [7].	5
Ilustración 4: Esquema general de la fabricación del cemento [8].	5
Ilustración 5: Aparato Vicat, determinación de la consistencia del cemento y del tiempo de fraguado. El instrumento consiste en una estructura metálica, escala graduada con índice, una sonda deslizante de 300 g, émbolo para medir la consistencia de 10 mm de diámetro, placa de vidrio [12].	7
Ilustración 6: Distintos niveles de escala según lo nanométrico [26].	18
Ilustración 7: Clasificación de los nanomateriales según sus dimensiones [27].	21
Ilustración 8: Isopropóxido de titanio IV ($\text{Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$) (Autoría propia). ..	23
Ilustración 9: Bandas de emergía en conductores, aislantes y semiconductores [27].	24
Ilustración 10: Estructuras cristalinas de TiO_2 : (a) anatasa, (b) rutilo y (c) brookita [33].	25
Ilustración 11: Estructuras moleculares 3D del TiO_2 en fase anatasa (a) y fase rutilo (b)[29].	27
Ilustración 12: Esquema de fotocátalisis en una superficie con TiO_2 [37].	28
Ilustración 13: Gráfica obtenida por difractómetro de rayos X, RIGAKU Ultima IV de la muestra usando 0.5 ml agua desionizada. Laboratorios del IIER, 2023 [59].	49
Ilustración 14: Gráfica obtenida por difractómetro de rayos X, RIGAKU Ultima IV de la muestra sin usar agua desionizada. Laboratorios del IIER 2023, [59].	50
Ilustración 15: Gráfica obtenida por difractómetro de rayos X, RIGAKU Ultima IV. Laboratorios del IIER, 2024 [59].	52
Ilustración 16: Inicio de prueba de inhibición de microorganismos con nanopartículas de TiO_2 :4%Ag (Autoría propia).	54

Ilustración 17: Final de prueba de inhibición de microorganismos con nanopartículas de TiO ₂ :4%Ag (Autoría propia).	54
Ilustración 18: Resultados de la prueba de inocuidad a discos de pastas cemento-agua con nanopartículas de TiO ₂ :4%Ag (Autoría propia).	55
Ilustración 19: Resultados de la inhibición de la Ag en las nanopartículas de TiO ₂ :4%Ag (Autoría propia).	55
Ilustración 20: Inicio de prueba de inhibición de microorganismos (Autoría propia).	56
Ilustración 21: Final de prueba de inhibición de microorganismos (Autoría propia).	56
Ilustración 22: Prueba de inhibición no visible de la matriz de 8% de TiO ₂ :4%Ag (Autoría propia).	57
Ilustración 23: Nanopartículas de TiO ₂ :4%Ag, dos tubos de ensayo con AA9 y uno con AM a 6 h del inicio de la prueba 17-09 6:00pm (Autoría propia).	58
Ilustración 24: Nanopartículas de TiO ₂ :4%Ag, dos tubos de ensayo con AA9 y uno con AM a 18 h del inicio de la prueba 18-09 12:00pm (Autoría propia).	58
Ilustración 25: Nanopartículas de TiO ₂ :4%Ag, dos tubos de ensayo con AA9 y uno con AM, con tubo control de AA9 y otro de agua destilada a 42 h del inicio de la prueba 19-09 12:00pm (Autoría propia).	58
Ilustración 26: Nanopartículas de TiO ₂ :4%Ag, dos tubos de ensayo con AA9 y uno con AM, con 2 tubos control de AA9 y otro de agua destilada a 66 h del inicio de la prueba 20-09 12:00pm (Autoría propia).	59
Ilustración 27: Fin de la prueba de degradación del AA9 y AM con las nanopartículas de TiO ₂ :4%Ag a 90 h (Autoría propia).	59
Ilustración 28: Grafica de la absorbancia del AM y AA9 por su degradación con las nanopartículas de TiO ₂ :4%Ag (Autoría propia).	60
Ilustración 29: Esquirlas de pastas cemento-agua con 0% al 8% TiO ₂ :4%Ag y dos tubos de ensayo control con AM al inicio de la prueba (Autoría propia).	61
Ilustración 30: Esquirlas de pastas cemento-agua con 0% al 8% TiO ₂ :4%Ag y dos tubos de ensayo control al final de la prueba (Autoría propia).	61
Ilustración 31: Comparación de esquirlas de pastas cemento-agua con 0% al 8% TiO ₂ :4%Ag al final de la prueba en estado seco (Autoría propia).	62
Ilustración 32: Grafica de la absorbancia del AM y su degradación por las matrices con nanopartículas de TiO ₂ :4%Ag prueba (Autoría propia).	63

Ilustración 33: Esquirlas de pastas cemento-agua con 0% al 8% $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ y dos tubos de ensayo control con AA9 al inicio de la prueba (Autoría propia).	64
Ilustración 34: Esquirlas de pastas cemento-agua con 0% al 8% $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ y dos tubos de ensayo control con AA9 a 22 h del inicio de la prueba (Autoría propia).	64
Ilustración 35: Esquirlas de pastas cemento-agua con 0% al 8% $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ y dos tubos de ensayo control con AA9 a 44 h del inicio de la prueba (Autoría propia).	65
Ilustración 36: Esquirlas de pastas cemento-agua con 0% al 8% $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ y dos tubos de ensayo control con AA9 a 50 h del inicio de la prueba (Autoría propia).	65
Ilustración 37: Esquirlas de pastas cemento-agua con 0% al 8% $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ y dos tubos de ensayo control con AA9 a 68 h del inicio de la prueba (Autoría propia).	65
Ilustración 38: Esquirlas de pastas cemento-agua con 0% al 8% $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ y dos tubos de ensayo control con AA9 a 74 h del inicio de la prueba (Autoría propia).	66
Ilustración 39: Esquirlas de pastas cemento-agua con 0% al 8% $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ y dos tubos de ensayo control con AA9 a 98 h del inicio de la prueba (Autoría propia).	66
Ilustración 40: Comparación del AA9 que estuvo bajo resguardo y el que estuvo junto a los otros tubos de ensayo bajo el sol (Autoría propia).	67
Ilustración 41: Comparación de esquirlas de pastas cemento-agua con 0% al 8% $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ al final de la prueba en estado seco (Autoría propia).	67
Ilustración 42: Grafica de la absorbancia del AA9 y su degradación por las matrices con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ prueba (Autoría propia).	68
Ilustración 43: Comportamiento de la concentración del AM. (Autoría propia).	69
Ilustración 44: Comportamiento de la concentración de la placa espécimen de 8% de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ en 140 ml de solución de 10 ppm de AA9 (Autoría propia).	70
Ilustración 45: Conceptualización del problema de la iluminación no total del espécimen y por ende no tener la capacidad de hacer reacciones fotocatalíticas en la superficie curva del disco de pasta cemento-agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ (Autoría propia).	71

Ilustración 46: Cambio de metodología de las placas de pasta de cemento-agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ (Autoría propia).....	72
--	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Compuestos principales del cemento portland [7].	6
Tabla 2: Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción [15].	9
Tabla 3: Requisitos aprox. de agua de mezclado y contenido de aire según el revenimiento y TMA [15].	10
Tabla 4: Relación agua/cemento, según la resistencia deseada y el aire atrapado o no [15].	11
Tabla 5: Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto [15].	12
Tabla 6: Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica [16].	14
Tabla 7: Criterios para evaluar la resistividad eléctrica o riesgo de corrosión del acero de refuerzo. (NMX-C-514-ONNCCE-2019)(NMX-C-530-ONNCCE-2018)[17,18].	15
Tabla 8: Criterios para evaluar la VPU (NMX-C-530-ONNCCE-2018) [18]	15
Tabla 9: Velocidad de aplicación de carga. (NMX-C-083-ONNCCE-2020)[20].	16
Tabla 10: Cantidades de materiales para 9 cubos de 2.5 cm ($a/mC=0.6$) (Autoría propia).	33
Tabla 11: Cantidades de materiales por mezcla para realizar los especímenes (autoría propia).....	34
Tabla 12: Resultados de la VPU de los cubos con $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ (Autoría propia).	53
Tabla 13: Concentración final del AM y AA9 al final de la prueba (Autoría propia).....	60
Tabla 14: Concentración inicial del AM y al final de la prueba (Autoría propia).	62
Tabla 15: Concentración inicial del AM y al final de la prueba (Autoría propia).	67

ÍNDICE DE ECUACIONES

(1) Ec. Relación agua-cemento	11
(2) Ec. Cantidad de cemento	11
(3) Ec. Masa específica	12
(4) Ec. Resistividad eléctrica	14
(5) Ec. Esfuerzo a compresión	16
(6) Ec. Ley de Lambert-Beer	45

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

- AA9= Azul ácido 9.
- ACI= American Concrete Institute.
- AM= Azul de metileno.
- ASTM= American Society for Testing and Materials.
- CQD= Carbon Quantum Dots (Puntos Cuánticos de Carbono).
- CPC= Cemento Portland Compuesto.
- DRX= Difracción de Rayos X.
- E. coli= Escherichia coli de referencia ATCC 25922.
- IIER= Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables
- NO_x= Óxidos de Nitrógeno.
- ONNCCE= Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- ROS= Especies Reactivas de Oxígeno (Reactive Oxygen Species).
- SEMARNAT= Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Sox= Óxidos de Azufre.
- TMA= Tamaño Máximo del Agregado.
- TiO₂= Dióxido de titanio.
- TiO₂:4%Ag= Nanopartículas de dióxido de titanio dopadas al 4% con plata.
- UMSNH= Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- UNICACH= Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
- UV-VIS= Espectrofotómetro Ultravioleta-Visible.
- VPU= Velocidad de Pulso Ultrasónico.

Agradecimientos

Agradezco a mi mamá, Enf. Emma Rodríguez Cortes, por todo el apoyo que me dio y me ha dado toda mi vida, y claro durante la maestría.

Agradezco a mi papá, Sergio Gómez López, que en paz descanse, porque sus conocimientos siguen presentes en mí y seguirán.

A mis hermanos por soportar mis noches de desvelo investigando o preparándome para proyectos o pruebas.

A mi querida mejor amiga Karla Patricia Ayala Mercado, por escucharme hasta el hartazgo, en más de una ocasión literalmente, sobre mi investigación, tanto en los inconvenientes como en los aciertos.

A mi mejor amigo Luis Antonio Castañeda Méndez por apoyarme con sus acertados comentarios sobre mi experiencia académica y de vida.

A mi buena amiga la Enf. Erika Lizbeth Fabela Villalón, por conversar conmigo a altas horas de la noche, ella haciendo guardia en su hospital, yo investigando artículos.

A mi querida amiga Sandra Belén López Reyes por hacer que comiera de la mejor manera y así cuidar mi salud durante este tiempo.

A mis amigos Jaqueline, Ricardo, Patricia y Lucio por invitarme a jugar videojuegos (Halo en específico) lo cual me genero calma en más de una manera.

A mi asesor el Dr. Hugo Luis Chávez García, por su guía durante la maestría, por su apoyo para obtener oportunidades, por su disponibilidad a pesar de su carga de trabajo.

A mi coasesor Dr. Jorge Alberto Borrego Pérez, que me permitió ser parte de su investigación y poder usar parte de esta para mi tema de investigación en la maestría, por permitirme e impulsar mi estancia de investigación que me llevo más allá de lo que nunca me había aventurado en el país, por guiarme en la investigación y lograr enfrentar las diversas complicaciones que se presentaron en la investigación, muchas gracias.

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán le agradezco enormemente como apoyo en todo lo posible y más, para mi entrada en la maestría, enfrentando complicaciones

presentadas por ciertas cuestiones, por guiarme desde la licenciatura hasta el Laboratorio de Materiales, le estoy muy agradecido.

Dr. Wilfrido Martínez Molina le agradezco energéticamente su apoyo durante toda la maestría y desde antes de entrar en la misma, así como su consideración para incluirme en diversos proyectos de investigación que lograron despertar aún más mi curiosidad.

Dr. Mauricio Arreola Sánchez le agradezco sus consejos para la investigación, así como para congresos y otros proyectos que se realizaron, me da gusto que sea parte de mi mesa sinodal.

Agradezco al Laboratorio de Materiales Ing. Luis Silva Ruelas en especial a la Sección de Materiales Sustentables, donde fue mi base de investigación principal, donde puede avanzar en el conocimiento de manera práctica y teórica, y gracias a su personal que siempre es cálido, amable y atento. Así como a mis compañeros del laboratorio.

Agradezco a la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental por aceptarme y apoyarme a obtener conocimiento de alto valor, así como a mis compañeros que en lo que podían ayudaban a la investigación como Lupita, Michelle, Hiram, Osmar, Jacky y más.

Al Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (IIER), de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) agradezco sus conocimientos y equipos para la investigación, así como agradezco a su personal por la atención brindada.

Al Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, en el Laboratorio de Biotecnología Vegetal, agradezco en especial al Dr. Rafael Salgado Garciglia, a la Dra. Alejandra Hernández García y a la doctorante Janet Karina Hernández Ramón por su apoyo a la investigación con materiales, técnicas y equipo prestado, les agradezco.

Al Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química, en el Laboratorio de Investigación Ambiental agradezco al Dr. José Apolinar Cortés y a la doctorante Carleni Sarai Castellanos Henriquez por su apoyo a la investigación con materiales, técnicas, capacitación y equipo prestado, muchas gracias.

Agradezco al SECIHTI por la beca que me fue brindada para realizar esta investigación.

Agradezco a Dios por ponerme en el camino y permitirme tener una vida adecuada.

Dedicatorias

A mi mamá Enf. Emma Rodríguez Cortes, que gracias a su apoyo no me tuve que preocupar de muchas cosas, que, aunque me quedara despierto a altas horas de la noche pasaba a revisar que estuviera bien, y a apagar la luz de mi cuarto si ya estaba dormido. Gracias, mamá por todo, te quiero mucho, gracias por darme inteligencia y creatividad.

A mi papá el maestro albañil Sergio Gómez López, que en paz descansa, sus conocimientos siguen en mí; pero creo que lo más importante es su creatividad e ingenio para resolver problemas que en apariencia eran infranqueables, no obstante, solo era ver más allá y seguir. Gracias, papá espero que estes platicando mucho, como siempre, con conocidos y extraños, donde sea que estes.

A mis seres queridos, que me escucharon, apoyaron y consolaron cuando fue necesario, los quiero mucho y gracias por siempre creer en mí.

I.-RESUMEN

La contaminación actualmente va en incremento debido al crecimiento de la población y a las actividades antropogénicas, que elevan los índices de contaminación. Esta contaminación no sólo afecta a las zonas centrales de las ciudades, sino que también tiene repercusiones en las edificaciones en las cuales habitamos.

Se han realizado diversas investigaciones tratando de aminorar las consecuencias y repercusiones que la contaminación genera a los seres vivos. Una de ellas es el uso de procesos de oxidación avanzada para la degradación de contaminantes. Uno de los pilares de esos procesos es la fotocátalisis heterogénea, en la cual el uso de un catalizador ayuda a la mineralización del contaminante en compuestos simples.

Uno de los catalizadores más usados es el dióxido de titanio (TiO_2), el cual actúa utilizando la luz ultravioleta (UV) para generar reacciones de óxido-reducción que descomponen los diversos contaminantes y microorganismos. Para mejorar la

eficiencia de este material, se ha usado diferentes elementos para incrementar la absorción de luz y la afinidad fotocatalítica. La plata (Ag), un elemento con propiedades antibacterianas ha demostrado ser uno de los más eficientes en la mejora de las propiedades del TiO_2 .

En ese trabajo de investigación se explora la incorporación de nanopartículas de TiO_2 dopadas con Ag en matrices cementicias para su uso en recubrimientos. Se incorporó TiO_2 dopado con Ag al 4% ($\text{TiO}_2\text{:4\%Ag}$) en diversos porcentajes, con el objetivo de analizar su comportamiento químico y mecánico, así como su eficiencia en la degradación de contaminantes y la eliminación de microorganismos.

Se realizaron caracterizaciones estructurales por medio de DRX para conocer la fase del catalizador. Asimismo, se evaluaron sus propiedades mecánicas mediante velocidad de pulso ultrasónica (VPU), y las pruebas fotocatalíticas consistieron en la degradación de los colorantes azul de metileno (AM) y azul ácido 9 (AA9). Para las pruebas antimicrobianas se usó *E. coli* de referencia.

Palabras clave: Semiconductores, nanotecnología, innovación en cementos, sostenibilidad, eficiencia fotocatalítica.

II.-ABSTRACT

Pollution is currently on the rise due to population growth and anthropogenic activities, which increase pollution levels. This pollution not only affects central areas of cities but also has repercussions on the buildings in which we live.

Various studies have been conducted to mitigate the consequences and repercussions of pollution on living beings. One of these is the use of advanced oxidation processes for the degradation of pollutants. One of the pillars of these processes is heterogeneous photocatalysis, in which the use of a catalyst helps to mineralize the pollutant into simple compounds.

One of the most widely used catalysts is titanium dioxide (TiO_2), which acts by using ultraviolet (UV) light to generate oxidation-reduction reactions that break down various pollutants and microorganisms. To improve the efficiency of this material, different elements have been used to increase light absorption and photocatalytic affinity. Silver (Ag), an element with antibacterial properties, has proven to be one of the most efficient in improving the properties of titanium dioxide (TiO_2).

This research explores the incorporation of silver-doped titanium dioxide nanoparticles into cementitious matrices for use in coatings. Silver-doped titanium dioxide at 4% ($\text{TiO}_2\text{:4\%Ag}$) was incorporated in various percentages to analyze its chemical and mechanical behavior, as well as its efficiency in degrading pollutants and eliminating microorganisms.

Structural characterizations were performed using XRD to determine the catalyst phase. Its mechanical properties were also evaluated using ultrasonic pulse velocity (UPV), and the photocatalytic tests consisted of the degradation of methylene blue and acid blue 9 dyes. Reference *E. coli* was used for the antimicrobial tests.

III.-JUSTIFICACIÓN

La contaminación ambiental continúa incrementándose de manera constante, sin indicios claros de aminorar dicho crecimiento, afectando tanto a la atmosfera como a las superficies de las construcciones y a la población, la cual también están en continuo crecimiento y, por ende, más susceptible a los efectos nocivos de los contaminantes presentes en el entorno.

Las superficies de edificaciones siguen creciendo a un ritmo constante, lo que representa una oportunidad para incorporar materiales con propiedades fotocatalíticas que contribuyan a aminorar la contaminación y la presencia de microorganismos. Desarrollar recubrimientos autolimpiantes aplicables en las superficies de las edificaciones permite obtener materiales que ayudan a mitigar esta problemática y, además, requieren menor mantenimiento, mejorando así la calidad de vida de la población.

Diversos estudios han demostrado que el TiO_2 es un catalizador efectivo en los procesos de fotocatálisis heterogénea, gracias a que, bajo la luz ultravioleta (UV), realizan reacciones de oxido-reducción que degradan contaminantes y microorganismos. No obstante, cuando el TiO_2 se dopa con Ag, aumenta su capacidad de absorción de luz, potenciando las reacciones fotocatalíticas.

Esta investigación propone integrar nanopartículas de TiO_2 dopadas con Ag en matrices cementicias, pastas cemento-agua, con el fin de obtener superficies con propiedades fotocatalíticas aplicables en edificaciones, capaces de degradar contaminantes e inhibir microorganismos. De esta manera, se busca contribuir al

desarrollo de materiales de construcción sostenibles y a la mejorar de la calidad de vida de la población [1,2].

IV.-OBJETIVO GENERAL

Sintetizar nanopartículas de TiO_2 dopadas con 4% de Ag para incorporar en mezclas de pasta cemento-agua, y analizar la eficiencia de la degradación de contaminantes y la inhibición de los microorganismos mediante reacciones fotocatalíticas de la manera más óptimamente posible.

V.-OBJETIVOS PARTICULARES

- Sintetizar nanopartículas de TiO_2 .
- Caracterizar las nanopartículas TiO_2 para confirmar la obtención fase anatasa.
- Dopar las nanopartículas TiO_2 con 4% de Ag.
- Caracterizar las nanopartículas.
- Elaborar muestras (cubos) de mezclas de cemento-agua adicionadas con nanopartículas de TiO_2 :4%Ag.
- Caracterizar las muestras (cubo) de TiO_2 :4%Ag para conocer sus características, físicas, estructurales, ópticas.
- Caracterizar la eficiencia fotocatalítica de las pastas adicionada con TiO_2 :4%Ag.
- Medir la eficiencia fotocatalítica en la degradación de contaminantes.
- Determinar la inhibición de los microorganismos con los especímenes.

VI.-HIPÓTESIS

Incorporar nanopartículas de TiO_2 dopadas con Ag como adición en matrices cementicias, pueden degradar contaminantes e inhibir microorganismos, potencialmente nocivos para el ser humano, esto mediante la degradación fotocatalítica.

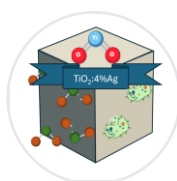
1.-INTRODUCCIÓN

El aire, a nivel mundial, se encuentra cada vez más contaminado debido a las actividades antropogénicas. Puede considerarse que toda la atmosfera del planeta presenta algún grado de contaminación, ya que un contaminante es cualquier sustancia presente en una concentración superior a la que el medio requiere para mantener su equilibrio químico natural, los contaminantes son, por ende, muy diversos; sin embargo, los de mayor relevancia en la actualidad son los gases como el monóxido de carbono (CO), los óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV), el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂) [3].

En la búsqueda de alternativas para reducir la contaminación del aire, la presente investigación propone el uso de nanopartículas de TiO₂ dopadas con Ag, con el propósito de degradar contaminantes e inhibir microorganismos mediante las reacciones fotocatalíticas que dichas nanopartículas generan. El dopaje con Ag se realizará debido a su posible capacidad para mejorar la absorción de luz del TiO₂, con lo que incrementaría su eficiencia y ampliaría su potencial fotocatalítico. Estas nanopartículas se incorporarán en mezclas de cemento-agua para la elaboración de pastas que puedan emplearse como recubrimientos.

Las nanopartículas de TiO₂ dopadas con Ag, se sintetizarán mediante el método sol-gel, obteniendo el TiO₂ en su fase anatasa, la cual presenta la mayor capacidad para realizar reacciones fotocatalíticas. Una vez obtenida esta fase, se procederá con el dopaje de las nanopartículas usando una sal de Ag, en este caso nitrato de Ag, añadida durante la síntesis para poder dopar las nanopartículas en un 4%.

Se elaborarán especímenes cúbicos de 2.5 cm de pastas cemento-agua con diferentes proporciones de nanopartículas de TiO₂ dopadas con Ag (2%, 4%, 6%, y 8% respecto al peso del cemento), con el objetivo de determinar el porcentaje óptimo para maximizar las reacciones fotocatalíticas. Dichas reacciones permitirán la degradación de contaminantes mediante la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), las cuales también afectan a los microorganismos inhibiéndolos [1].



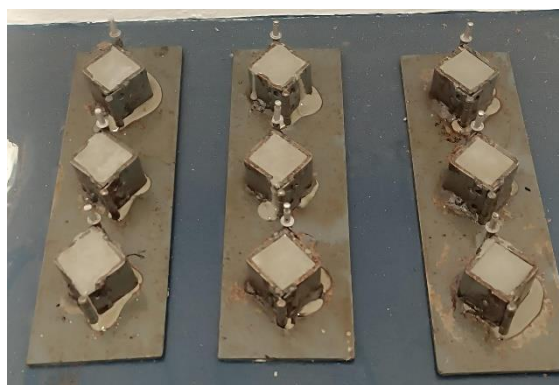


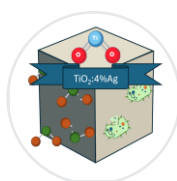
Ilustración 1: Cubos de 2.5 cm (Autoría propia).

2.-ANTECEDENTES

En el 2017 Borrego Pérez, J. A., Courel, M., Pal, M., Paraguay Delgado, F., & Mathews, N. R., hicieron una investigación con el título “Effect of ytterbium doping concentration on structural, optical and photocatalytic properties of TiO_2 thin films” en la cual se sintetizaron películas delgadas de nanopartículas de TiO_2 dopadas con iterbio (Yb), esto mediante la técnica de spin-coating sol gel, después de realizar pruebas como DRX, UV-Vis y fotorespuesta, se vio que el iterbio modificó las propiedades de las películas de TiO_2 en su eficiencia fotocatalítica, que lograron mejorar la degradación del AM (usado como contaminante genérico), esto en el porcentaje de dopante del iterbio de un 1% bajo la luz ultravioleta [4].

En el 2019 Borrego Pérez, J. A., Courel, M., Castañeda Valderrama, R., Hernández, I., Pal, M., Paraguay Delgado, F., & Mathews, N. R., con la investigación titulada “Structural, optical, and photoluminescence properties of erbium doped TiO_2 films” sintetizaron películas delgadas de nanopartículas de TiO_2 dopadas con Erblio (Er) mediante spin-coating sol gel, después de hacer pruebas tales como XRD, AFM, espectroscopia Raman y UV-Vis se vio como resultado que las películas dopadas tuvieron una modificación en el rango de la luz con que se realizaban las reacciones fotocatalíticas, hacia la luz visible en el rango de 520 a 560 nm [5].

En el año del 2023 Jiang, J., Dong, X., Wang, H., Wang, F., Li, Y., & Lu, Z., hicieron un proyecto titulado “Enhanced mechanical and photocatalytic performance of cement mortar reinforced by nano- TiO_2 hydrosol-coated sand” hizo un recubrimiento con nanopartículas de TiO_2 en arena para mortero de cemento, la cual mejoró las capacidades de la resistencia a la compresión en un 67% a los 28 días, también mejoró las capacidades fotocatalíticas, reducción a la porosidad en un 35%, mayor



degradación de Rodamina B y NO (contaminantes genéricos), ampliación del rango de luz de absorción, estos resultados mediante la $\text{TiO}_2@\text{Sand}$, que fue recubrir la arena natural con las nanopartículas de TiO_2 [2].

En el año 2023 Borrego Pérez, J. A., Morales, E. R., Paraguay Delgado, F., Meza Avendaño, C. A., Alonso Guzman, E. M., & Mathews, N. R., hicieron una investigación referente a las nanopartículas de TiO_2 dispersadas en Ag con el título “Ag nanoparticle dispersed TiO_2 thin films by single step sol gel process: Evaluation of the physical properties and photocatalytic degradation”, en la cual se hicieron películas delgadas de TiO_2 y TiO_2 dispersadas en Ag, mediante spin-coating sol-gel, se hicieron pruebas de DRX, análisis Raman, microscopio de fuerza atómica, UV-visible entre otras, observando que las películas tenían fase anatasa y la Ag esta presente como nanopartículas de 8 nm distribuidas en las películas, las películas de $\text{TiO}_2:\text{Ag}$ mostraron una mejoría en la eficiencia fotocatalítica, usando MB (azul de metileno) se logró apreciar una mejoría del 60% en la degradación (98% de degradación en 180min), con respecto a las no dopadas [1].

3.-MARCO TEÓRICO

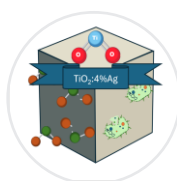
3.1.-Cemento

El cemento es un material cementante, lo que significa que cuando se hidrata el mismo tiene capacidades aglutinantes, que es lo mismo a que un pegamento pegue varios entes entre ellos, el cemento que se usa en la construcción de tipo civil es de materiales calcáreos.

Los cementos tienen varias formas de clasificación una de las más normales sería sus componentes, como son los silicatos y aluminatos de cal, como: cementos naturales, cementos portland y cementos de alta alúmina.

El cemento portland obtuvo su patente en 1824 por parte de Joseph Aspdin, y al contrario de lo que se cree no se llama Portland por crearse ahí, si no por tener un parecido a las piedras de Portland, que es una caliza obtenida de la cantera de Dorset.

La preparación del mismo se dio mediante arcilla finamente triturada y caliza triturada, en un horno hasta eliminar el CO_2 , en 1845 Issac Johnson repitió el proceso, pero hasta obtener el Clinker.



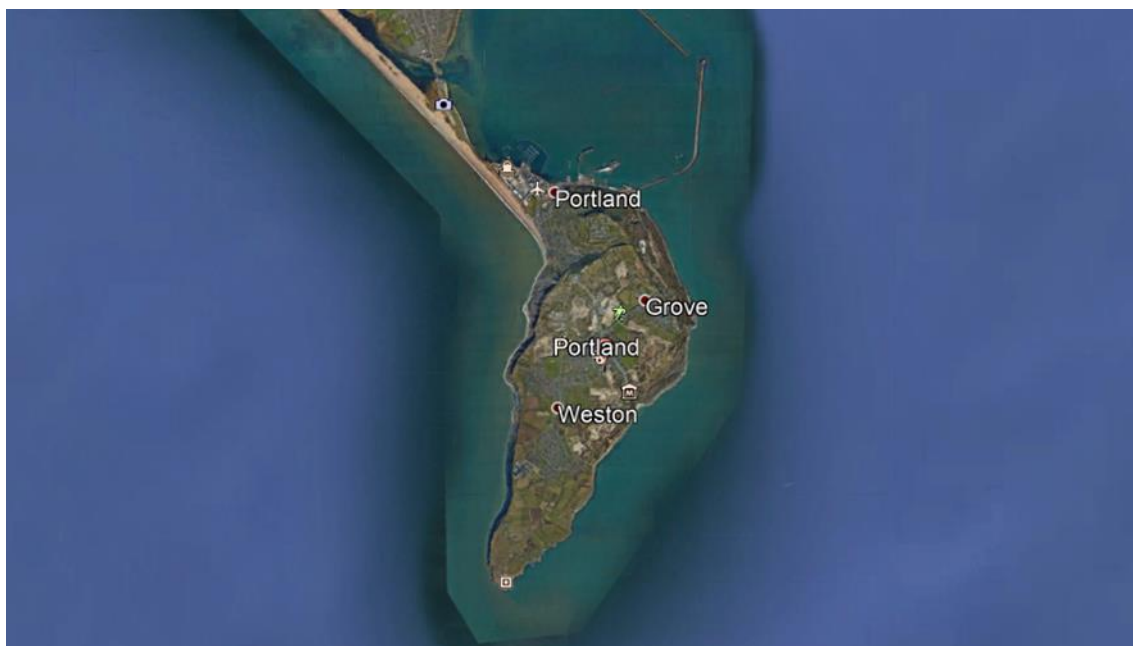
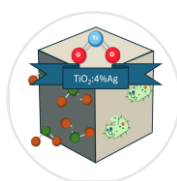


Ilustración 2: Isla de Portland, Dorset, Inglaterra, Reino Unido [6].

El cemento moderno es obtenido mediante la trituración y molienda del Clinker, adicionando yeso y otros elementos según sea el tipo de cemento y las características deseadas del mismo [7].

3.1.1.-Manufactura del cemento portland

El proceso de manufactura es sencillo en concepto, la materia prima que es la piedra caliza se tritura y adiciona con otros elementos hasta obtener un polvo muy fino, el cual se llama harina cruda, la cual se calienta con los gases de un horno, para después pasar a ese mismo horno a una temperatura de 1400 °C, es un horno giratorio, hasta formar cuasi esferas llamadas clínker, las cuales se enfrían para su posterior trituración y molienda hasta obtener otra vez un polvo fino que se le adiciona yeso para obtener el cemento que conocemos, se le adiciona otras materias igualmente finas para darles características deseadas [7].



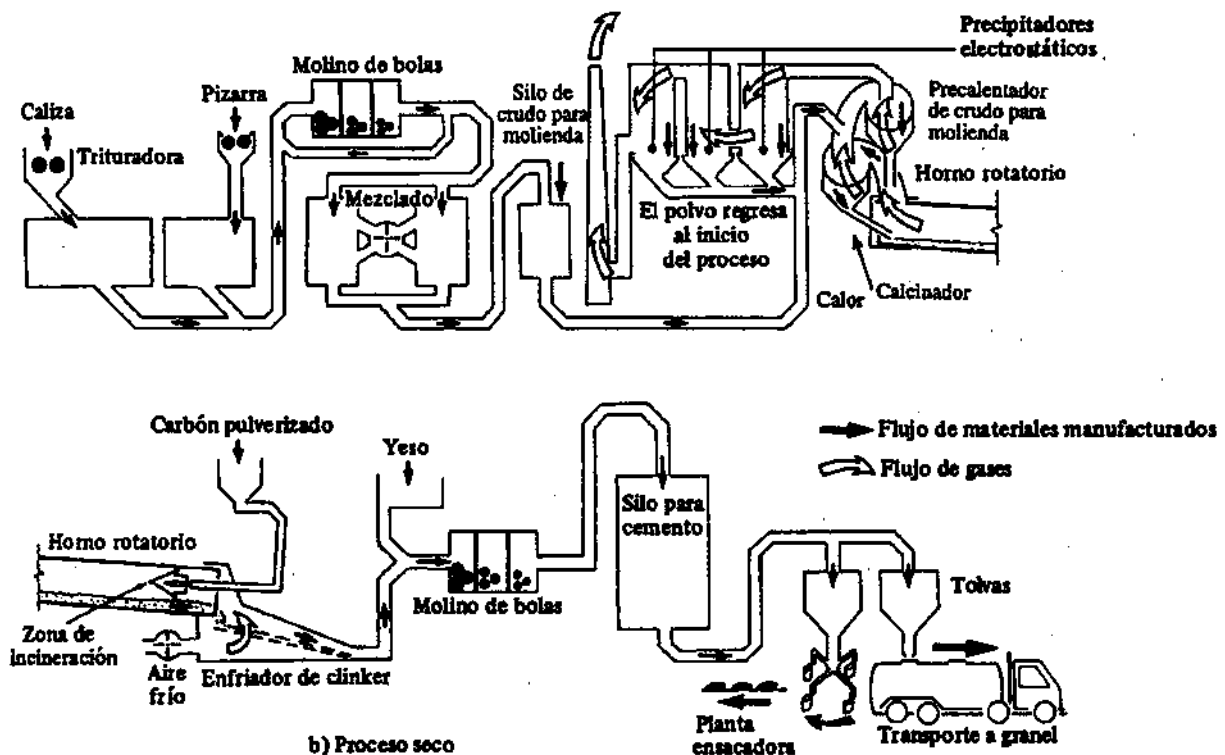


Ilustración 3: Representación esquemática de la fabricación del cemento [7].

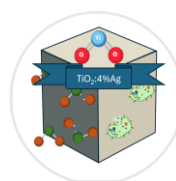
Podemos poner un esquema más simplificado para entender los procesos como una programación simple.



Ilustración 4: Esquema general de la fabricación del cemento [8].

3.1.2.-Composicion química

Las materias primas del cemento es una mezcla de cal, sílice, alúmina y oxido de fierro, los cuales en el horno formaran al Clinker, pero hay impurezas en el resultado al no reaccionar todas las materias [9].



En la siguiente tabla están los componentes principales del cemento.

Tabla 1: Compuestos principales del cemento portland [7].

Compuestos principales del cemento portland		
Nombre el compuesto	Composición de óxido	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Aluminoferrita tetracálcica	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

3.1.3.-Hidratación del cemento.

La hidratación del cemento es cuando los componentes del cemento reaccionan con el agua suministrada en el mismo. Primero el Aluminato tricálcico (C_3A) y el silicato tricálcico (C_3S) tienen una reacción exotérmica de cristalización [9].

3.1.4.-Fraguado del cemento.

El fraguado del cemento es un proceso fisicoquímico, en el cual el cemento se hidrata con agua, comenzando una reacción con los componentes del cemento, creando cristales que crecen y se van entrelazando entre ellos, obteniendo dureza. Mientras los cristales crecen y se entrelazan la pasta agua-cemento cambiara de estado líquido a estado sólido [10].

3.1.4.1.-Fraguado falso.

El fraguado falso es cuando el concreto obtiene dureza antes de lo previsto, se puede retornar a un estado de trabajabilidad si se mezcla de nuevo; pero eso hará perder resistencia [11].

3.1.4.2.-Tiempo de fraguado.

Para medir el tiempo de fraguado de una pasta cemento-agua podemos usar el equipo de Vicat y Gillmore, que consiste en agujas con cierta cantidad de peso que son puestas en la superficie de la pasta cemento-agua, para que sean introducidas en el hasta su endurecimiento total, a mayor tiempo de penetración mayor es el tiempo de fraguado final [10].

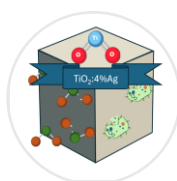




Ilustración 5: Aparato Vicat, determinación de la consistencia del cemento y del tiempo de fraguado. El instrumento consiste en una estructura metálica, escala graduada con índice, una sonda deslizante de 300 g, émbolo para medir la consistencia de 10 mm de diámetro, placa de vidrio [12].

3.1.5.-Calor de hidratación del cemento.

Al combinar agua con el cemento se produce una reacción química exotérmica, a ese fenómeno se le conoce como calor de hidratación.

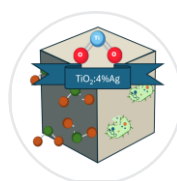
Es un parámetro que afecta al tiempo de fraguado y a la obtención de dureza del concreto o de la mezcla con cemento. También su control adecuado es vital para evitar grietas superficiales una vez ya fraguado el elemento con cemento [13].

3.1.6.-Mezclas con cemento

Una mezcla de cemento es aquella que contiene algún tipo de cementante en ella, en mayor o menor medida. El concreto es una mezcla de cemento portland con áridos, material grueso y agua, mientras que el mortero es cemento de baja resistencia; pero con mayor flexibilidad [9].

3.1.6.1.-Pastas cemento-agua

Una pasta cemento agua es un material cementante, como el cemento portland compuesto, y una cantidad de agua [9].



3.1.6.2.-Concreto

El concreto es una mezcla de cemento, con agregado fino, agregado grueso y agua. El agregado fino es un árido como la arena volcánica, mientras el agregado grueso son gravas, se recomienda grava obtenida de la trituración de rocas con igual o mayor resistencia a la necesitada, el agua debe ser potable o con la menor cantidad posible de contaminantes, por último, el cemento puede ser de varios tipos dependiendo de las demandas del elemento de concreto [14].

3.1.6.2.-Mortero

El mortero es una mezcla de cemento, agregado fino y agua potable; pero el cemento podrá estar en menor cantidad que en el caso del concreto y el agregado fino en mayor cantidad comparado con una mezcla de concreto. Estas mezclas suelen tener menor resistencia que el concreto y suele ser usados como recubrimientos, acabados de superficies y para la mampostería [7].

3.2.-Diseño de pastas cemento-agua.

El diseño de una pasta de agua cemento en si solo es una cantidad de agua acorde a la cantidad de cemento, según la resistencia deseada, o el uso que se dará al elemento de pasta cemento-agua [7].

3.2.1.-Diseño según el ACI

El “ACI” es el American Concrete Institute, es una organización con origen en E.U.A., que desarrolla estándares para la fabricación de concretos, para su optimización y seguridad. El ACI tiene LA Norma ACI 211.1 que nos dice 9 pasos para la correcta elaboración del concreto; pero que se puede tomar de base para las pasta cemento-agua, solo eliminando los pasos que no sean necesarios. Los 9 pasos son los siguientes [15].

3.2.1.1.-Selección del revenimiento

El revenimiento es una medida de la trabajabilidad, es usado para la fluidez deseada en las mezclas de concreto. En una pasta cemento-agua sería necesario para mantener una trabajabilidad adecuada al momento de colar el elemento deseado [15].

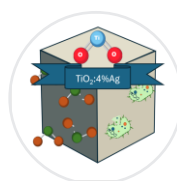


Tabla 2: Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción [15].

Tabla 6.3.1 Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción		
Tipos de construcción	Revenimiento, cm	
	Máximo*	Mínimo
Muros de cimentación y zapatas	7.5	2.5
Zapatas, cajones de cimentación y muros de sub-estructura sencillos	7.5	2.5
Vigas y muros reforzados	10	2.5
Columnas para edificios	10	2.5
Pavimentos y losas	7.5	2.5
Concreto masivo	7.5	2.5

emplean aditivos químicos, sin modificar la relación agua/cemento, evitando la segregación o el sangrado excesivo

3.2.1.2.-Selección del tamaño máximo del agregado (TMA)

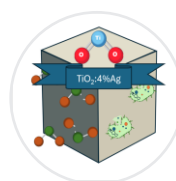
De acuerdo con el ACI-318 el agregado tendrá un tamaño máximo y no exceder de:

- 1/5 de la separación menor de los lados de la cimbra.
- 1/3 del espesor de la losa
- $\frac{3}{4}$ del espacio entre varillas o elementos de acero.

También el ACI-304 habla que si se usara una bomba para transportar el concreto entonces el agregado tendrá un tamaño máximo de

- 1/3 del diámetro interno de la tubería a usar, si el agregado es triturado anguloso.
- 2/5 del diámetro interno de la tubería a usar, si el agregado es redondeado.

En pastas de cemento-agua es por completo innecesario y por ende no se toma en consideración [15].



3.2.1.3.-Cantidad de agua de mezclado y contenido de aire

La cantidad de agua es por metro cubico de la mezcla a considerar, ese valor será ajustado al volumen de los elementos a colar. En la siguiente tabla 3 vemos la cantidad de aire a considerar según el revenimiento deseado y el TMA [15].

Tabla 3: Requisitos aprox. de agua de mezclado y contenido de aire según el revenimiento y TMA [15].

Tabla 6.3.3 Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado								
Revenimiento, cm	Agua, kg/m ³ para el concreto de agregado de tamaño nominal máximo (mm) indicado							
	9.5*	12.5*	19*	25*	38*	50*	75 ⁺	150 ⁺
2.5 a 5.0	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
15.0 a 17.5	243	228	216	202	190	160	160	-
Cantidad aproximada de aire en concreto sin aire incluido, %	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2

*Estas cantidades de agua de mezclado son para usarse en el cálculo del contenido de cemento para mezclas de prueba a una temperatura de 20 a 25°C.

* Son cantidades maximas para agregados gruesos angulosos, razonablemente bien formados y con granulometría dentro de los limites aceptados por las especificaciones.

* El empleo de aditivos químicos reductores de agua, que cumplen ASTM C 494, pueden reducir el agua de mezclado en un 5% o más.

* Para revenimientos mayores de 18cm y TMA<25mm, es necesario el empleo de aditivos químicos reductores de agua

+Los valores de revenimiento para concreto con agregado > 40mm están basados en pruebas de revenimiento, después de quitar las partículas mayores de 40mm, mediante cribado húmedo.

Siendo que no tenemos agregado grueso debemos dejar de lado esta tabla [15].

3.2.1.4.-Selección de la relación agua/cemento

La cantidad de agua es lo que más influye en la resistencia de la mezcla de concreto, en las pastas de cemento es lo mismo, vemos en la siguiente tabla 4 como es que la elección de la relación de agua cemento será la que dictamine la resistencia.

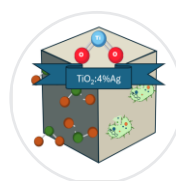


Tabla 4: Relación agua/cemento, según la resistencia deseada y el aire atrapado o no [15].

Resistencia a la compresión a 28 días (kg/cm ²)	Relación agua/cemento	
	Sin aire atrapado	Con aire atrapado
420	0.41	---
350	0.48	0.4
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Para pastas de cemento elegimos una resistencia que este en el promedio por ejemplo 0.6 con lo que con una interpolación nos daría 232.36 kg/cm² [15].

3.2.1.5.-Contenido de cemento

Esta relación se expresa en la siguiente ecuación.

$$\frac{a}{c} = x \quad (1)$$

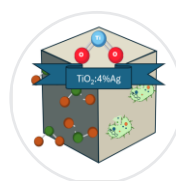
Donde: a= agua de la mezcla, c= masa del cementante, x= relación agua cementante.

Para obtener la cantidad de cemento que necesitamos será despejando la c, ya que el agua ya la sabemos por la cantidad de agua para el TMA y el revenimiento deseado.

$$c = a/x \quad (2)$$

Donde: a= agua de la mezcla, c= masa del cementante, x= relación agua cementante.

Para las pastas de cemento solo decidimos que resistencia base queremos para los elementos que vamos a colar, el agua la tomamos como la mínima [15].



3.2.1.6.-Estimación del contenido de grava

Teniendo el TMA y sabiendo el módulo de finura de la arena usamos la siguiente tabla 5 para poder obtener el contenido de grava por volumen.

Tabla 5: Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto [15].

Tabla 6.3.6 Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto				
Tamaño máximo nominal del agregado, (mm)	Volumen de agregado grueso* varillado en seco, por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura de la arena:			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 (3/8")	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53
19 (3/4")	0.66	0.64	0.62	0.60
25 (1")	0.71	0.69	0.67	0.65
38 (1 1/2")	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2")	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3")	0.82	0.80	0.78	0.76
150 (6")	0.87	0.85	0.83	0.81
*Volúmenes seleccionados a partir de relaciones empíricas para producir concreto con un grado de trabajabilidad adecuado para la construcción reforzada común.				
*Para concretos menos trabajables, como los requeridos en la construcción de pavimentos de concreto, se pueden incrementar en un 10% aproximadamente.				
*Para colados con bomba o áreas congestionadas, se puede reducir el volumen de agregado hasta en un 10%.				

En pastas de cemento-agua este parámetro es ignorado por falta de grava y arena en la pasta [15].

3.2.1.7.-Estimación del contenido de arena

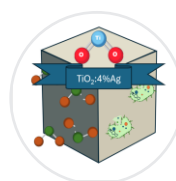
El volumen de la arena será determinado por la diferencia del volumen de los componentes del concreto.

Usando la siguiente ecuación:

$$Masa\ específica\left(\frac{kg}{m^3}\right)=\frac{Masa\ (kg)}{Volumen(m^3)} \quad (3)$$

Donde: Masa específica= masa específica del componente, Masa= masa del componente, Volumen= volumen del componente.

Despejado el volumen, para obtener el volumen del cemento, agua, grava y vacíos, se suman y la diferencia para llegar a 1m³ será la cantidad de arena en volumen.



En la pasta de cemento-agua no se necesita la arena, con lo que este paso también será omitido [15].

3.2.1.8.-Ajustes por humedad de los agregados

La humedad de los agregados como la arena y la grava pueden proporcionar mas agua al diseño de la mezcla, interfiriendo en la resistencia del diseño y en el revenimiento, siendo que el agua absorbida por los agregados no afecta el diseño; pero si el mismo ya está saturado y superficialmente este húmedo, eso si se deberá considerar para el ajuste.

Siendo que en las pastas de cemento-agua, el cemento debe estar completamente seco y no se cuenta con agregados entonces un ajuste por humedad es innecesario [15].

3.2.1.9.-Ajustes de las mezclas de prueba

Se hacen mezclas de concreto de prueba a una menor escala que la real, para determinar si el revenimiento deseado es alcanzado con éxito, de no ser así se agregara o retirara agua para obtenerlo, pero manteniendo la relación agua/cemento (a/M_c) con lo que se deberá agregar igualmente cemento para mantener dicha relación [15].

3.3.-Pruebas a especímenes de pastas cemento-agua

3.3.1.-Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es una prueba no destructiva y es el recíproco de cada material de su conductividad, su unidad de medición es el ohm-cm u ohm-m, la resistividad eléctrica está relacionada con la durabilidad del concreto o pastas endurecidas de cemento-agua, debido a la microestructura y porosidad de los mismos, ya que el flujo de corriente eléctrica se espera sea mayor cuanto mayor sea su porosidad e interconexión de los poros, con lo que la resistividad eléctrica será menor, si por el contrario la porosidad e interconexión es menor entonces la resistividad eléctrica será mayor.

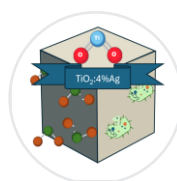


Tabla 6: Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica [16].

Resistividad del Concreto (ρ) k Ω .cm	Pronóstico de Corrosión
$\rho > 200$	Poco Riesgo
$200 > \rho > 10$	Riesgo Moderado
$\rho < 10$	Alto Riesgo

La prueba de resistividad eléctrica consiste en:

- Verificar que el resistometro esté preparado y en condiciones óptimas.
- Enumerar especímenes y obtener sus dimensiones.
- Se humedece la tela microfibra y se ponen en las caras del espécimen.
- Se ponen placas metálicas, que están conectadas al resistometro, por encima de las telas de microfibra humedecidas.
- Se pone un peso muerto no metálico encima de las placas para garantizar el adecuado contacto entre los elementos mencionados.
- Se aplica corriente con el resistometro y se guarda la lectura.

Se aplica la ecuación:

$$\rho = \frac{Re * A}{L} \quad (4)$$

Donde:

ρ =Resistividad eléctrica, en k Ω *cm

Re =Resistencia eléctrica, en k Ω

A = Área de la sección transversal, en cm²

L =Longitud del espécimen, en cm.

Con lo que se verifica los resultados con la siguiente tabla

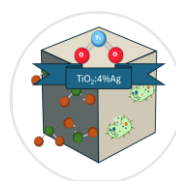


Tabla 7: Criterios para evaluar la resistividad eléctrica o riesgo de corrosión del acero de refuerzo. (NMX-C-514-ONNCCE-2019)(NMX-C-530-ONNCCE-2018)[17,18].

Resistividad	Probabilidad de corrosión
> 100 kΩ·cm - 200 kΩ·cm	Porosidad interconectada extremadamente baja
50 kΩ·cm a 100 kΩ·cm	Porosidad interconectada baja
10 kΩ·cm a 50 kΩ·cm	Porosidad interconectada de consideración
< 10 kΩ·cm	Porosidad interconectada excesiva

El procedimiento es siguiendo la norma NMX-C-514-ONNCCE-2019[17].

3.3.2.-Velocidad de Pulso Ultrasónico

La VPU, es una prueba no destructiva que consiste en usar ondas ultrasónicas para verificar la porosidad del espécimen y su homogeneidad.

Otra forma de definir el VPU sería como la relación entre la distancia que recorren las ondas ultrasónicas a través del concreto o del elemento de pasta cemento-agua.

Los especímenes deben estar saturados para la prueba de VPU, siguiendo la Norma NMX-C-275-ONNCCE-2020.

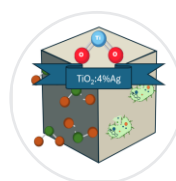
El procedimiento sería el siguiente:

- En el equipo de VPU se selecciona la distancia que va a recorrer las ondas según el espécimen.
- Se selecciona la cantidad de pulsos que se darán a la muestra.
- Se coloca gel entre las caras a probar del espécimen y los transductores del VPU.
- El VPU arrojará la velocidad de pulso en m/s, se tomará la lectura que se repita dos veces seguidas o tres veces en 5 intentos.

Usando la siguiente tabla 9 podemos verificar si el elemento es adecuado o no.

Tabla 8: Criterios para evaluar la VPU (NMX-C-530-ONNCCE-2018) [18]

VPU (m/s)	Clasificación del concreto
V>4575	Excelente
4575>V>3660	Bueno
3660>V>3050	Cuestionable
3050>V>2135	Pobre
V<2135	Muy pobre



La VPU también nos puede dar indicios de la dispersión de los distintos elementos que puede tener la matriz cementicia [19].

3.3.3.-Comprensión simple

Es una prueba destructiva para determinar la resistencia máxima a la comprensión del concreto o del elemento de pasta cemento-agua, es la propiedad mecánica más importante de los elementos de concreto y por ende es la más usada para saber la calidad del mismo, se hace la prueba usando la Norma NMX-C-083-ONNCCE-2020.

El procedimiento es el siguiente:

- Se toma las dimensiones del espécimen a probar.
- Se cabecea o se usan placas de neopreno en el espécimen.
- Se coloca el espécimen centrado en la maquina universal, la maquina universal y las placas deben estar limpias y libres de sustancias ajenas.
- Se ajusta la placa superior en el espécimen sin poner carga en el mismo.
- Se aplica carga de manera continua a una velocidad uniforme hasta la falla del espécimen. Para la velocidad a aplicar se usa la siguiente tabla

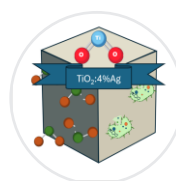
Tabla 9: Velocidad de aplicación de carga. (NMX-C-083-ONNCCE-2020)[20].

Forma del espécimen	Diámetro de los especímenes cm (pulgadas)	Área nominal (cm ²)	Carga mínima kN/s (t/min)	Carga máxima kN/s (t/min)
Cilindros	5.00 (2")	19.64	0.4 (2.4)	0.6 (3.6)
	7.50 (3")	44.18	0.9 (5.4)	1.3 (8.1)
	10.00 (4")	78.54	1.6 (9.6)	2.4 (14.4)
	15 (6")	176.72	3.5 (21.6)	5.3 (32.4)

- Se registra la carga de ruptura del espécimen

Ahora se aplica la siguiente ecuación para obtener el esfuerzo a la comprensión.

$$R = W/A \quad (5)$$



Donde:

R =Esfuerzo a compresión que resiste el espécimen a cierta edad (kg/cm^2).

W =Carga máxima de ruptura (kg).

A =Área de la sección transversal del espécimen (cm^2).

La resistencia obtenida se comparará con la del proyecto para saber el porcentaje alcanzado a una cierta edad y saber si el elemento está obteniendo la resistencia deseada o esperada [20,21].

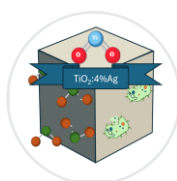
3.4.-Innovaciones en las propiedades del cemento.

Las innovaciones en el campo de las mezclas con cementantes son variados, interesantes e insospechados en algunas vertientes.

En la cuestión de los agregados se tienen varios estudios centrados en agregar o sustituir los agregados finos y gruesos por materiales de desechos o por materiales con propiedades deseadas para trabajos específicos, un ejemplo sería el uso del PET, vidrio, agregado grueso reciclado de demoliciones, etc. Se han utilizado una diversidad de materiales que pueden cambiar las propiedades de los elementos de concreto, según el propósito del elemento [22,23].

En cambio, las sustituciones o agregados al cemento también tienen una diversificación sorprendente, una adición sería simplemente agregar un material tan fino como el cemento al mismo, para alterar sus características, mientras una sustitución sería quitar una parte del cemento y remplazarla con otro material igual o más fino que el cemento para cambiar sus características. Los materiales para las adicciones y sustituciones pueden ser de varios tipos como cenizas orgánicas, que se ha visto que aumentan la flexión; pero disminuyen la capacidad de compresión y aumenta la porosidad de los especímenes, también escoria de los altos hornos, que se ha visto que aumenta en varios casos la capacidad a la compresión de los especímenes.

Los puntos cuánticos en el cemento es una innovación muy compleja, en la cual se trabaja o se quiere trabajar directamente con la microestructura del concreto o elementos de cemento, usando puntos cuánticos de diversas sustancias para que actúen en el cemento de una manera mucho más estrecha que los niveles anteriores,



un ejemplo sería los puntos cuánticos de Carbón (CQD), que se han visto ayudan a la contención de agua en recipientes de concreto manteniendo su solubilidad de manera óptima por más tiempo, así como minimizar la toxicidad en el mismo. Pero algunos resultados han arrojado un aumento más allá del 50% en las propiedades de la flexión y la resistencia a la compresión, con lo que los CQD se pueden usar para aumentar las características mecánicas de los elementos de cemento [24].

Por otra parte, el uso de nanopartículas en las mezclas a base de un cementante se ha visto que mayormente interfieren en las características mecánicas, pero se le ha dado mayor énfasis en incorporar propiedades fotocatalíticas al cemento. Con lo que el estudio de las nanopartículas como adición o sustitución al cemento es un campo muy grande de explorar con lo que ahondar en el mismo es un universo de posibilidades para las mezclas con base de un cementante para varias funciones [25].

3.4.1-Nanomateriales

Los nanomateriales son aquellos que tienen alguna de sus dimensiones en la nanoescala, la nano escala es aquella donde las medidas son inferiores a los 100 nanómetros. Un nanómetro, que su término nano deriva del griego que significa enano, es una mil millonésima parte de un metro, un milímetro son 1'000'000.00 nanómetros, para que un material sea considerado un nanomaterial es indispensable que, aunque sea una de sus dimensiones sea menor a los 100 nm, las dimensiones de un material son X, Y y Z [26].

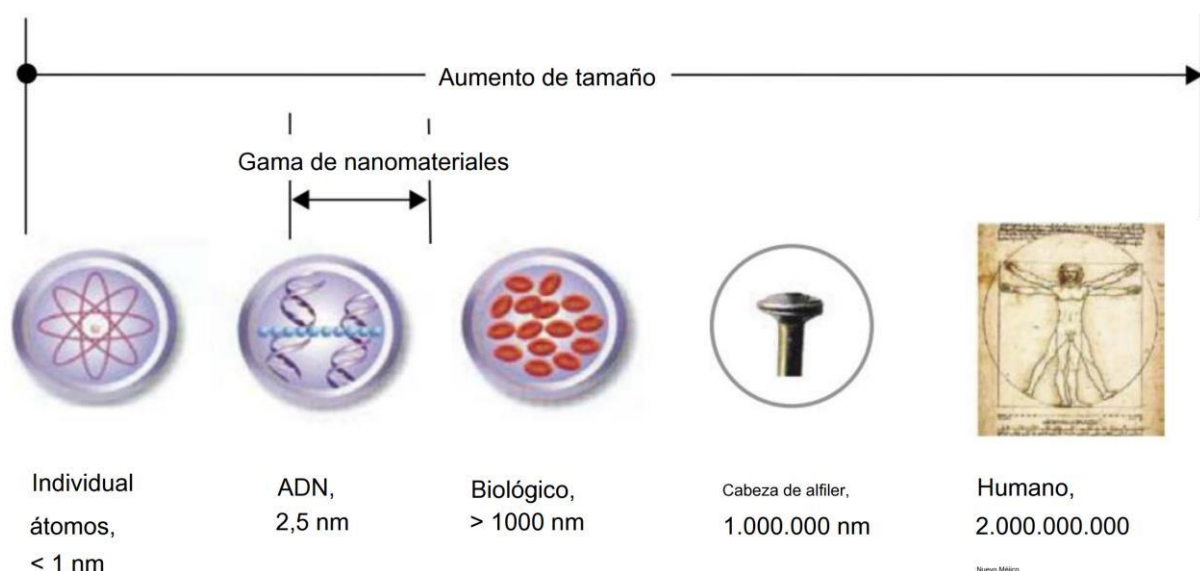
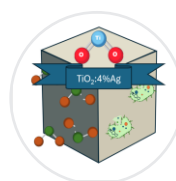


Ilustración 6: Distintos niveles de escala según lo nanométrico [26].



3.4.2.-Tipos de nanomateriales

Los nanomateriales podemos dividirlos según las dimensiones en la nanoescala que tengan:

3.4.2.1.- 0-D Nanopartículas

Son aquellas partículas donde todas sus dimensiones son menores a los 100 nm. Las posibles características de estas nanopartículas son: amorfos o cristalinos, monocristalinos o policristalinos, ser de elementos individuales o multiquímicos, formas y figuras variables, existencia individual o en una matriz, pueden ser cualquier tipo de materiales fundamentales como metálicos, cerámicos o polímeros [27].

3.4.2.2.- 1-D Nanocables, nanotubos o nanobarras

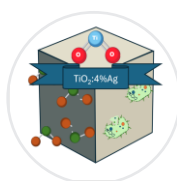
Aquellos nanomateriales donde dos de sus dimensiones son nanométricas; pero la última no. Al igual que los nanomateriales 0-D, los 1-D pueden ser amorfos o cristalinos, mono o policristalinos, químicamente puros o impuros, existencia individual o dentro de otros y poder ser de cualquier material fundamental [27].

3.4.2.3.- 2-D Nanopelículas o nanorecubrimientos

Nanomateriales con solo una dimensión en la escala nanométrica. Tienen formas laminares como escamas u hojuelas, sus características son que pueden ser amorfos o cristalinos, tener diversas composiciones químicas posibles, pueden ser una sola capa o múltiples capas, se pueden depositar en un sustrato, estar en una matriz, ser de cualquier material fundamental [27].

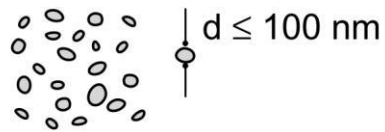
3.4.2.4.- 3-D Materiales nanocristalinos y nanocompuestos.

Esta clasificación es más interesante debido a su posible debate y polémica, ya que ninguna de sus dimensiones está en la nanoescala; pero entonces ¿porque se toman como nanomateriales?, es debido a que presentan características a nanoescala y pueden ser conjuntos de cristales nanométricos, pueden ser cristalinos o amorfos, puros o impuros químicamente, ser materiales compuestos, estar compuestos de multicapas y poder ser de cualquier material fundamental [27].

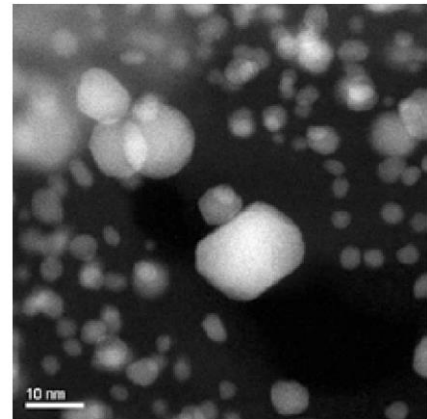


0-D

All dimensions (x, y, z) at nanoscale

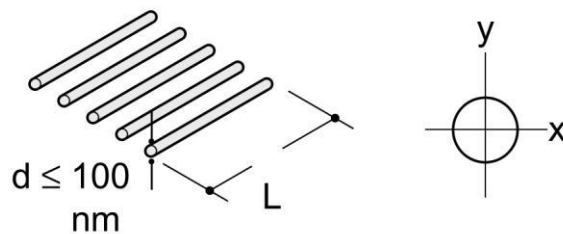


Nanoparticles

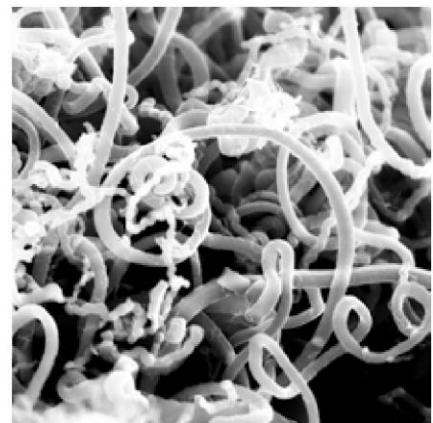


1-D

Two dimensions (x, y) at nanoscale, other dimension (L) is not

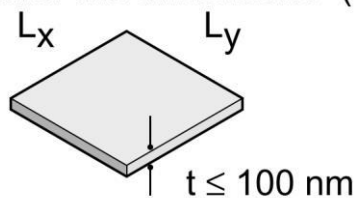


Nanowires, nanorods, and nanotubes

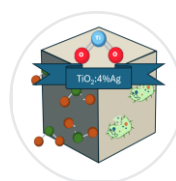
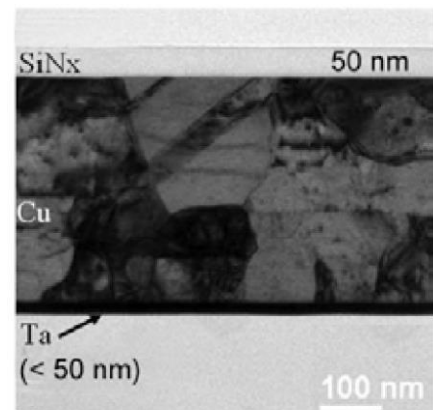


2-D

One dimension (t) at nanoscale, other two dimensions- (L_x, L_y) are not

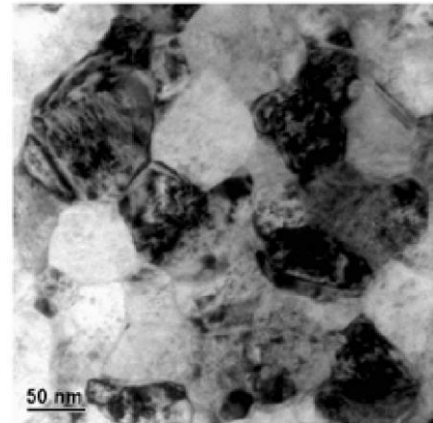
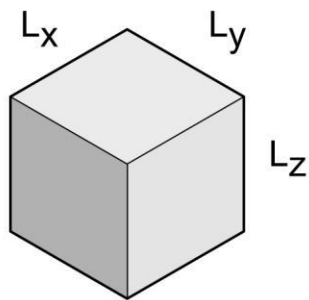


Nanocoatings and nanofilms



3-D

No bulk dimension at nanoscale



Nanocrystalline and nanocomposite materials

Ilustración 7: Clasificación de los nanomateriales según sus dimensiones [27].

3.5.-Nanopartículas

Las nanopartículas son menores a 100 nanómetros, con lo que son partículas absolutamente pequeñas, imposible de ver al ojo humano si no están en gran cantidad, hay muchos materiales, elementos y compuestos que pueden llegar a tener tales dimensiones después de ciertos procesos para poder crearlas, como sería la síntesis por el método sol-gel, pulverización y calcinación, que permite crear nanopartículas como las de esta investigación de TiO_2 [28].

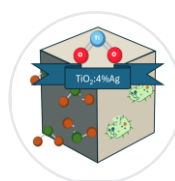
3.5.1.-Creación de nanopartículas

Las nanopartículas tienen dos enfoques para crearlas [26].

3.5.1.1.-Top-Down

Significa desde arriba hacia abajo, este enfoque para crear nanopartículas parte desde elementos macro, entiéndase como materiales más grandes que la nanoescala; pero no necesariamente tan grandes como podría ser un lingote de algún metal, a los elementos macro se les reducen a los tamaños de la nanoescala de las nanopartículas. Algunos procesos o técnicas podrían ser:

- Litografía: fotolitografía, litografía de haz de electrones, litografía de rayos x.
- Litografía blanda: microcontact printing, micromoldeo.
- Molienda.
- Métodos químicos.
- Volatilización de sólidos.
- Fresado mecánico.



- Ablación laser
- Electroexplosión
- Sputtering

[26].

3.5.1.2.-Bottom-Up

Significa desde abajo hacia arriba, este enfoque se concentra en usar reactivos precursores para crear las nanopartículas:

- Síntesis de fluidos supercríticos
- Proceso Sol-Gel

Esos son solo algunos de los métodos de los dos enfoques para crear nanopartículas; pero hay más y derivaciones de los mismos[26].

En esta investigación se utilizó el método Sol-Gel para crear las nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$.

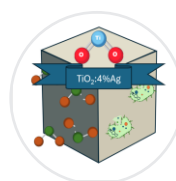
3.5.2.-Metodo Sol-Gel

El método Sol-Gel es un proceso para crear nanopartículas según el enfoque Bottom-Up, es un proceso químico en húmedo, ósea que los reactivos a usar están en estado líquido, es excelente para obtener nanopartículas de alta pureza y homogeneidad.

Lo primero es forma el “sol”, esto se realiza mediante precursores químicos y junto a un solvente como sería un alcohol, o agua, se mezclan para añadir un catalizador que sería un ácido o una base para provocar reacciones de hidrolisis. Los productos de la hidrolisis sufren condensación formando una red tridimensional de las nanopartículas obtenidas, siendo el “sol”, que envejeciendo evoluciona al “gel”, el cual se deja reposar para envejecerlo más y poder proceder a secarlo para evaporar el solvente y generar materiales densos, opcionalmente se calcina para eliminar residuos o aumentar la cristalinidad [29].

3.5.3.-Dopaje

El dopaje es añadir de manera intencional impurezas a un material, pero con el fin de mejorar o dotar al material de características deseadas, ocasionado que tengamos un mejor material, el dopaje es introducir en un material tanto dentro como fuera de el, pero unidos a el, esas impurezas. Podemos clasificar el dopaje en:



- Puntual: es sustituir un átomo por otro, para lo cual los átomos deben ser semejantes en sus radios atómicos.
- Intersticial: afecta la forma de la celda unitaria, al tener el átomo del dopaje entre celdas del material.
- Frenkel: se ingresa al átomo del dopaje de manera forzada al material

Si bien el dopaje es para obtener características deseadas puede afectar a otras [29].

3.5.4.-Dióxido de titanio

El TiO_2 es un semiconductor que absorbe luz del espectro UV, es anfótero y con alta estabilidad química. Es un fotocatalizador muy empleado actualmente, que se utiliza para degradar moléculas orgánicas en procesos como la purificación del agua. Tiene tres fases cristalinas rutilo (tetragonal), anatasa(tetragonal) y brookita(ortorrómbica), esta última muy rara vez se encuentra [30,31].

El TiO_2 es ampliamente usado alrededor de las diversas industrias humanas, es usado para mantener colores blancos de alta calidad, además de como adición en otros para potenciar ciertas características, con lo que su uso es aceptado por la comunidad, sin verlo como un posible daño a la misma. En la investigación es fácil de sintetizar y de conseguir precursores con lo que no será más que por su precio algún contratiempo [32].

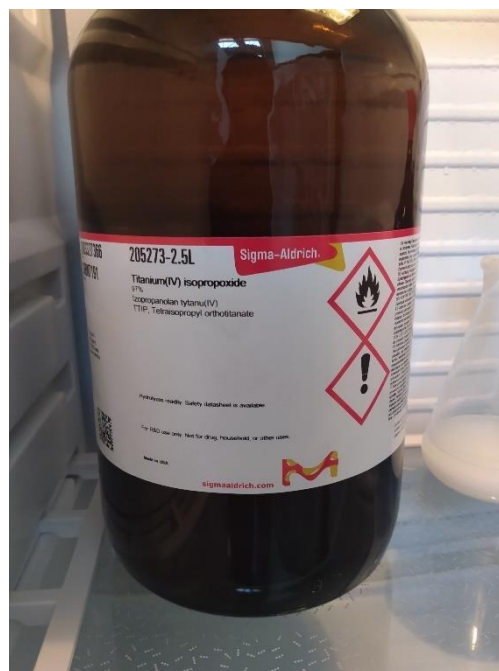
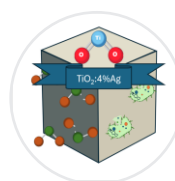


Ilustración 8: Isopropóxido de titanio IV ($\text{Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$) (Autoría propia).



3.5.5.1.-Bandas de conducción y valencia del TiO_2

La banda de valencia es aquel nivel energético más alto de un material que contiene electrones, la banda de conducción es el siguiente nivel energético de un material que esta parcialmente vacío o vacío por completo, con lo que los electrones pueden pasar libremente, la banda de gap es la brecha que hay entre la banda de valencia y la banda de conducción. Los materiales cristalinos pueden ser de tres tipos según su banda de valencia este más cerca o lejos de su banda de conducción, o visto de otra manera sería según cuanta energía se necesita para que un electrón de la banda de valencia pase a la banda de conducción, se clasifican en:

- Conductores: tiene su banda de valencia y la de conducción prácticamente unidas, con lo que se necesita muy poca energía para que electrones de la banda de valencia pasen a la de conducción, los metales son buenos conductores.
- Aislantes: tiene su banda de valencia y la de conducción separadas por una brecha o banda de gap muy grande, con lo que la energía necesaria para que los electrones lleguen desde la banda de Valencia a la de conducción es realmente enorme, los materiales cerámicos son buenos aislantes.
- Semiconductores: tiene una banda de gap más estrecha que los aislantes y la cantidad de energía para que pase electrones de la banda de valencia a la de conducción es moderada.

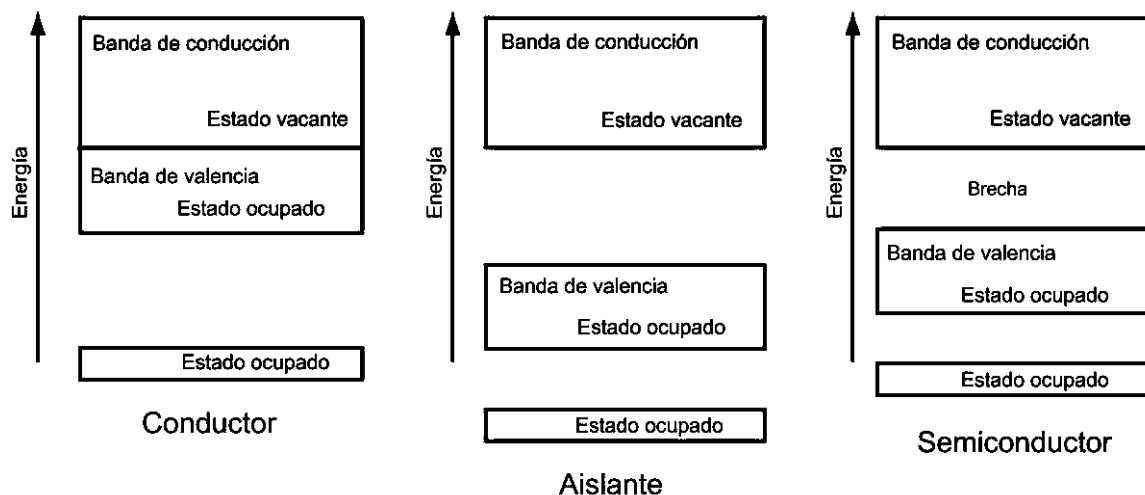
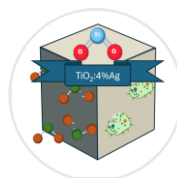


Ilustración 9: Bandas de energía en conductores, aislantes y semiconductores [27].



El TiO_2 es un semiconductor, el cual podemos excitar mediante rayos UV para que sus electrones pasen de su banda de valencia a la de conducción, causando de esa manera reacciones fotocatalíticas [27].

3.5.5.2.-Fases cristalinas del TiO_2 y estructura cristalina

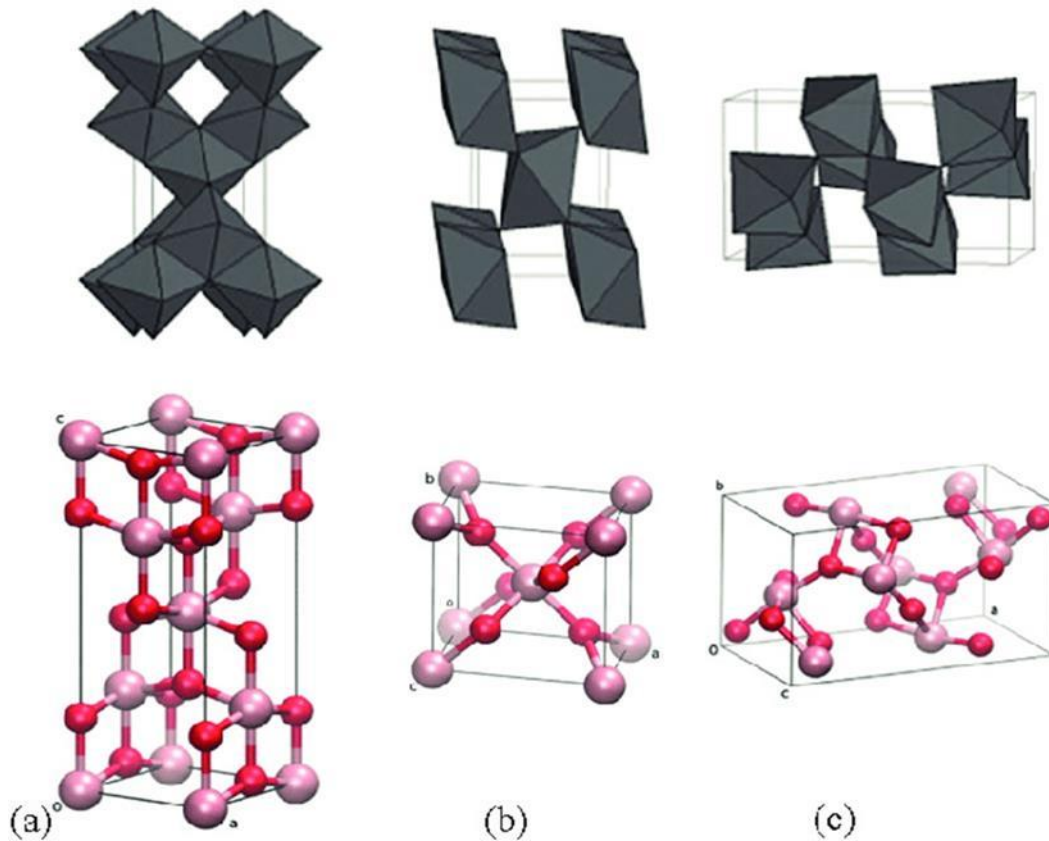
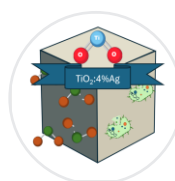


Ilustración 10: Estructuras cristalinas de TiO_2 : (a) anatasa, (b) rutilo y (c) brookita [33].

Las fases cristalinas de un material dependen de 4 escalones:

- Sistemas cristalinos: son 7 sistemas cristalinos y son
 1. Cúbico
 2. Tetragonal
 3. Ortorrómbico
 4. Romboedral
 5. Hexagonal
 6. Tricíclico
 7. Monoclinio



- Red espacial: o redes de Bravais, son 14 y son derivaciones de los sistemas cristalinos. Es el arreglo periódico de los puntos geométricos que se repiten periódicamente.
- Grupo puntual: son 32
- Grupo espacial: son 230

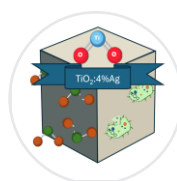
Sabiendo esos 4 escalones conocemos la estructura cristalina y podremos saber la celda unitaria que es la agrupación más pequeña de átomos que conservan la estructura cristalina para formar un cristal.

El TiO_2 tiene tres fases cristalinas rutilo (tetragonal), anatasa(tetragonal) y brookita (ortorrómbica); pero para esta investigación la fase anatasa es en la que nos vamos a concentrar

Entonces el TiO_2 en fase anatasa es un cristal con las siguientes características según lo visto:

- Sistema cristalino: Tetragonal
- Red espacial: Tetragonal centrada en el cuerpo
- Grupo puntual: 4/mmm
- Grupo espacial: $I4_1/amd$ (grupo espacial n° 141)

También otros parámetros de red del TiO_2 son $a=b=3.8\text{\AA}$, $c=9.492\text{\AA}$, los planos característicos del DRX del TiO_2 son $25.37^\circ(101)$, $37.89^\circ(004)$, $47.84^\circ(200)$, $54.42^\circ(105)$, $62.73^\circ(204)$, $69.19^\circ(116)$, con lo que tenemos la información necesaria para entender al TiO_2 para la investigación [31,34].



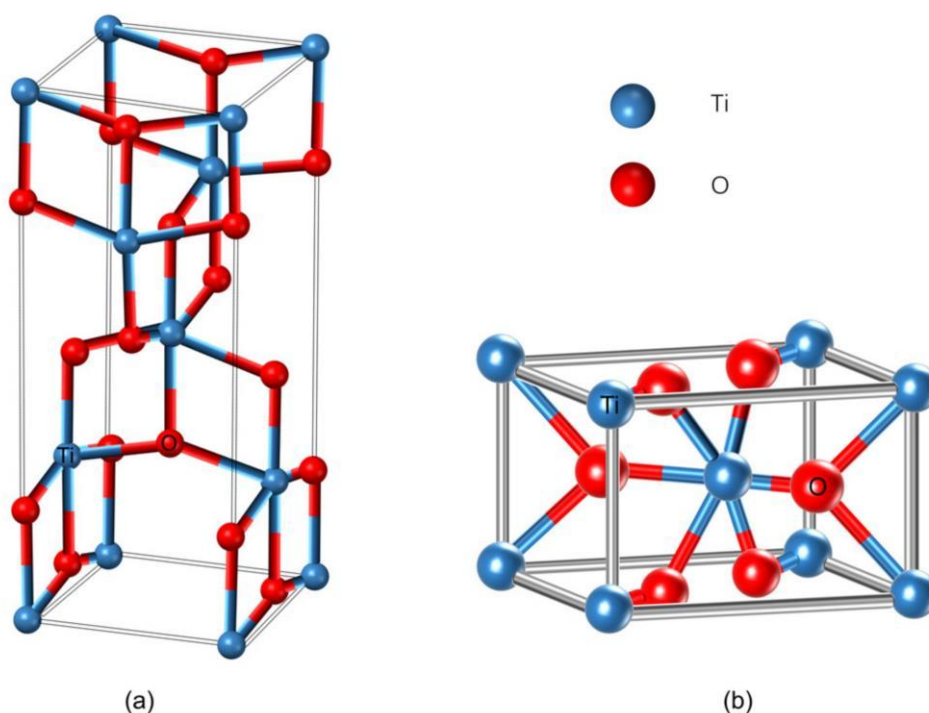


Ilustración 11: Estructuras moleculares 3D del TiO_2 en fase anatasa (a) y fase rutilo (b)[29].

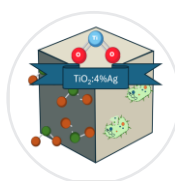
3.5.5.3.-Difracción de rayos X

La difracción de rayos X es una técnica usada para determinar la estructura cristalina y fase de materiales cristalinos, como la fase anatasa en el TiO_2 , para saber esos datos los DRX tienen una base de datos con el patrón único de DRX que tiene cada sustancia cristalina, el cual se le conoce como difractograma, pensemos en el como una huella digital para cada sustancia cristalina y esa huella digital está en una base de datos internacional que al compararla con una muestra que no sabemos que es podemos saber su fase cristalina [34–36].

3.6.-Fotocatálisis

La fotocatalisis parte de la propia naturaleza y su capacidad de descontaminarse por su cuenta. Es parecida a la fotosíntesis, usa la luz para poder eliminar el CO_2 , NO_x , SO_x , COVs, mediante un proceso de oxidación.

W. Ostwald define un catalizador como un elemento que aumenta la velocidad de una reacción a la cual este se le adiciona. No es ni reactivo ni producto, se puede decir que simplemente está presente.



Un fotocatalizador es similar a un catalizador; la diferencia radica en que este se activa y aumenta la velocidad cuando recibe la energía suficiente proveniente de una fuente de luz.

Entonces la fotocatálisis es una reacción fotoquímica que activa la superficie del fotocatalizador a través de la energía de la luz mineralizando los contaminantes por medio de reacciones de reducción y oxidación por medio de superóxidos y superhidroxilos.

Cuando el fotocatalizador tiene energía suficiente libera una serie de radicales (O_2^{*-} y OH^*) libres que chocan con las moléculas de NO_x , SO_x , COV y otras moléculas susceptible, con lo que son degradadas y se transforman en materiales y compuestos inofensivos [37].

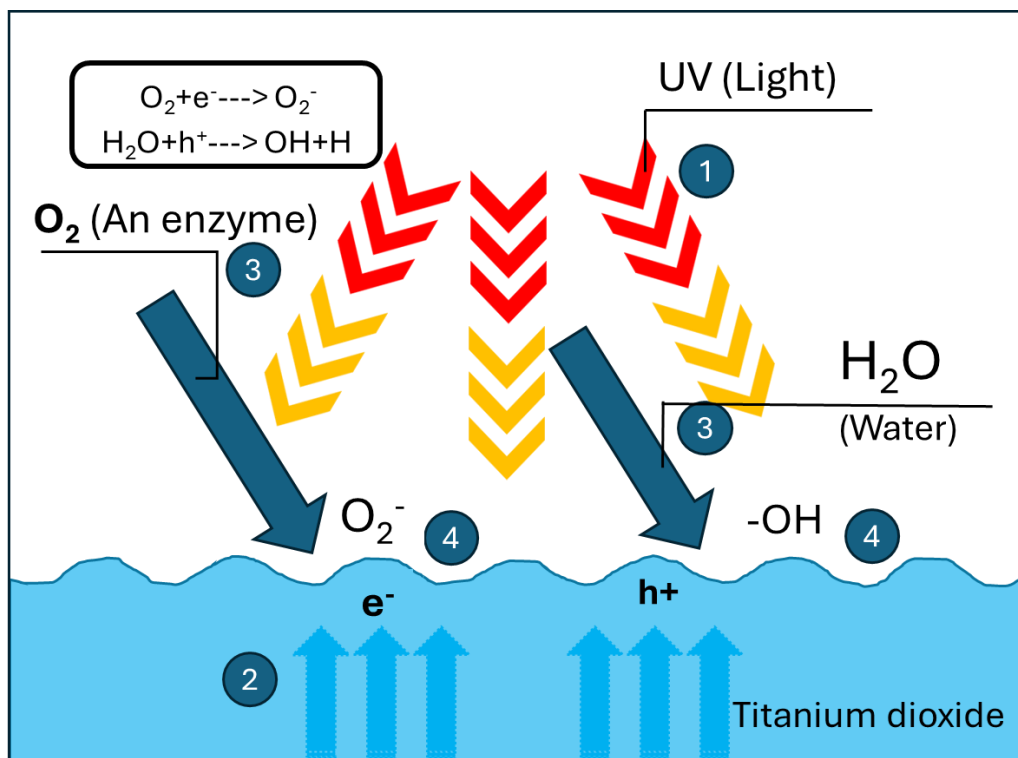
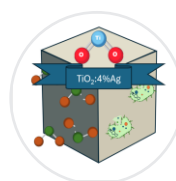


Ilustración 12: Esquema de fotocatálisis en una superficie con TiO_2 [37].

3.7.-Contaminantes genéricos

Un contaminante genérico es aquellos que en investigaciones se usan más a menudo, debido a su facilidad de uso, por su comportamiento similar a los contaminantes encontrados en el medio ambiente; pero son fácilmente controlables, medibles y de costo relativamente bajos, algunos de esos contaminantes son el AM o el AA9 [38]. también debemos hablar que cada vez más en el mundo hay contaminantes



emergentes como son los medicamentos diversos, cada vez más usados en la población en general, pero su desecho es inapropiado [39].

Ambos colorantes siguen perfectamente la ley de Lambert-Beer, con lo que usando un UV-VIS HACH DR/4000U spectrophotometer se mide la absorbancia y usando la ley de Lambert-Beer, donde $A=abc$ (A =Absorbancia, a =absortividad, b =distancia del camino óptico en cm, c =Concentración de la solución) obtendremos la concentración del contaminante, aparte la gráfica que nos proporciona el UV-VIS, muestra como el contaminante se degrada [40].

3.7.1.-Azul de metileno

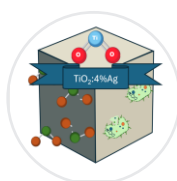
El AM es un contaminante genérico, usado en investigaciones para evaluar la eficacia de técnicas, métodos, sustancias, etc., para removerlo, degradarlo o disolverlo[38], es sospechosos de ser cancerígeno así que se debe manejar con cuidado, si se rompe su grupo cromóforo, que es la parte de su molécula que ocasiona su color azul, se considera que fue degradado a una molécula más simple, que dependiendo del nivel y la forma de degradar el AM puede obtener otro color visible, o si la degradación es altamente efectiva hacer que el AM pierda cualquier color y pase a ser moléculas muy simples sin capacidad de proyectar color [41].

3.7.2.-Azul ácido 9

El AA9, es un colorante, usado en la industria alimentaria, en la textil y es usado como contaminante genérico a degradar, absorber, adsorber o tratar en varios estudios, hay que tener un cuidado considerable con él, debido a ser considerado cancerígeno, usar equipo de protección siempre al trabajar con él. Su estructura molecular estable hace que degradarlo sea difícil, pero eso mismo hace que sea perfecto como contaminante genérico, la parte de la molécula del AA9 que ocasiona que tenga ese color azul brillante se llama grupo cromóforo, el cual si es destruido se considera que la molécula del colorante ha sido degradada como el AM [41].

3.8.-Microorganismos a usar Escherichia coli de referencia ATCC 25922

La Escherichia coli es un organismo unicelular perfecto para monitorear la resistencia de sobrevivencia y reproducción de microorganismos. La E. coli de referencia ATCC 25922 es una sepa no patógena, de serotipo O6, biotipo 1, es una bacteria Gram-negativa con una capa externa de lipopolisacáridos, aislada en 1946 de una muestra



clínica humana, es ampliamente usada en microbiología veterinaria y alimentaria, [42–45].

La *E. coli* es un patógeno de interés, debido a su amplia distribución y su facilidad para ser nocivo para el ser humano, causando enfermedades como la gastroenteritis. Es un patógeno que se puede encontrar desde fuentes de agua, no tratadas o contaminadas, pero también se encuentra en diversas superficies y puede estar adherida a partículas de polvo que pueden ser aspiradas por el ser humano [46].

En esta investigación es el microorganismo que se usara para verificar la capacidad de inhibición de las reacciones fotocatalíticas de los espécimenes.

3.8.1.-Agar

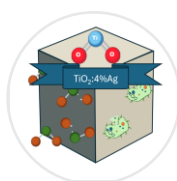
Es un medio de cultivo solido para las bacterias, se usa para identificar y hacer proliferar distintos tipos de microorganismos, existen varios tipos; pero de los más usados es el agar Mueller-Hinton [47]. En este medio solido se siembran los microorganismos y se ponen también las sustancias a evaluar sus efectos en los microorganismos, el agar Mueller-Hinton es perfecto para sembrar microorganismos; pero también les otorga un buen crecimiento, además la difusión de sustancias para inhibir microorganismos es óptima, recomendando para ser usado para determinar la capacidad inhibitoria de sustancias [48].

3.8.2.-Caldo Mueller-Hinton

El caldo Mueller-Hinton es un medio de cultivo líquido, perfecto para hacer que los microorganismos se reproduzcan y proliferen; pero también es perfecto para tener un numero de microorganismos homogéneos en todo el líquido, haciendo que sea perfecto para sembrarlo en cajas de Petri con agar y los microorganismos se distribuyan de manera homogénea en el mismo[49]. El caldo Mueller-Hinton se ajusta con el estándar de 0.5 de turbidez de McFarland [48].

3.8.3.-Sembrado masivo en cajas de Petri con agar

El sembrado masivo en cajas de Petri con agar (agar Mueller-Hinton), se refiere a la dispersión de una suspensión bacteriana (caldo Mueller-Hinton) sobre la superficie del agar, usando un hisopo estéril, el cual se moja con la suspensión y se retirar el exceso de la suspensión para luego con la cabeza del hisopo distribuir la suspensión por toda la placa de la manera más uniformemente posible; pero sin dejar ninguna parte de la superficie sin tratar. De esta forma se obtiene un numero homogéneo de



microorganismos en la superficie del agar para que se multipliquen y se pueda observar de manera sencilla si una sustancia tiene o no capacidades inhibitorias de microorganismos [48,50].

3.8.4.-Halo de inhibición

El halo de inhibición es un resultado del método de difusión en agar, para determinar la capacidad de inhibición de microorganismos de un material, sustancia o técnica, enfocada en cajas de Petri con agar, se mide en mm, es un área en forma de círculo alrededor de la sustancia a evaluar su capacidad para eliminar, reducir o inactivar microorganismos. También para determinar si la sustancia tiene capacidades inhibitorias no visibles se toman muestras de cercanas a lo más lejanas de la sustancia y luego se siembran en otras cajas de Petri con agar para ver su crecimiento y la cantidad del mismo [51–53].

4.-DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1.-Elaboración de las nanopartículas de TiO_2

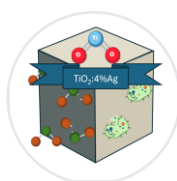
Las nanopartículas de TiO_2 se lograron mediante una síntesis que se hizo con isopropóxido de titanio IV ($\text{Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$) como precursor, a continuación, se mostrara los reactivos usados, el instrumental y el método de elaboración.

4.1.1.-Reactivos

- Isopropóxido de titanio IV ($\text{Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$) **10 ml.**
- Alcohol etílico ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) **60 ml.**
- Ácido acético glacial CH_3COOH , **8 ml.**
- Agua desionizada **0.5 ml.**

4.1.2.-Instrumental

- Matraz Erlenmeyer
- Agitador
- Recuperador de agitador
- Probeta graduada 100 ml
- Bureta de precisión
- Vaso de precipitado
- Base agitadora
- Base calentadora



- Mortero
- Crisol
- Mufla

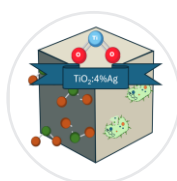
4.1.3.-Procedimiento

1. En una bureta de precisión se añaden 10 ml de alcohol etílico y 0.5 ml de agua desionizada (se debe poner el agua desionizada en un vaso de precipitado antes y usar una pipeta para tomar los 0.5 ml de agua, debido a la facilidad de contaminar el agua desionizada).
2. En un matraz se añaden 20 ml de alcohol etílico y 10 ml de Isopropóxido de titanio (IV) ($\text{Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$).
3. Se agita el precipitado del paso **2**, se agregan 30 ml de alcohol etílico y mediante pipeta se agregan 8 ml de ácido acético glacial.
4. Se enciende la base calentadora a 60°C.
5. La solución del paso **1**, puesta en una bureta de precisión, por goteo se agrega al precipitado del paso **3**, se agita por 1 h.
6. Se refrigera por 24 h, para posteriormente ponerla a evaporar la síntesis hasta obtener cristales.
7. Esos cristales se muelen en un mortero y se pasan a un crisol.
8. El crisol se pone en una mufla a 500 °C durante 1 hora, obteniendo las nanopartículas de TiO_2 .

4.2.-Dopaje con Ag

Para el dopaje de las nanopartículas se utilizó nitrato de Ag, el cual se presenta en forma de hojuelas. Para asegurar su correcta incorporación durante el proceso de dopaje, se procedió a su molienda en un mortero de ágata. El procedimiento del dopaje fue el siguiente:

1. Moler el nitrato de Ag con el mortero de ágata
2. Obtener la cantidad deseada y poner en un frasco limpio sin contaminación.
3. En una charola plástica para reactivos se puso 0.4g de nitrato de Ag.
4. En el método sol-gel, antes del paso **4** se agrega los 0.4g de nitrato de Ag
5. Se continúan los pasos del método sol-gel, logrando obtener nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$.



4.3.-Elaboración de especímenes de pasta cemento-agua con nanopartículas de TiO_2 dopadas con Ag

A continuación, veremos cómo se deberán hacer los especímenes de pasta cemento-agua, primero hablando de los materiales usados

4.3.1.-Cemento

Se usará cemento portland compuesto (CPC-30R-RS) que cumpla con las normas NMX-C-414-ONNCCE-2004, compuesto entre un 50-94% de Clinker y yeso, lo demás en porcentaje serían impurezas permitidas[54].

4.3.2.-Agua

Será suministrada directamente de la red de agua potable que proporciona el municipio de Morelia al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la UMSNH, siendo semejante al agua de una obra común de tipo civil; pero cumpliendo con la norma NMX-C-122-ONNCCE-2018 para uso en la construcción[55].

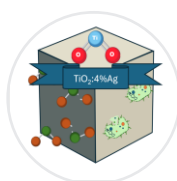
4.3.3.-Diseño de pastas de cemento

Para la investigación se propone una relación entre el agua y el material cementante (a/mC) de 0.6, que se usara para la elaboración de los especímenes, esto siguiendo las normas NMX-C-061-ONNCCE-2010 y la ASTM-C-109-2016, que aunque son de morteros, servirán para la investigación ya que la misma es encaminada a recubrimientos, con lo que características estructurales pasan a un trasfondo[56,57].

Tabla 10: Cantidades de materiales para 9 cubos de 2.5 cm (a/mC=0.6) (Autoría propia).

Material	Cantidad
Cemento	201.168gr
Agua	120.701ml
Nanopartículas de TiO_2 :Ag	$x\% * (\text{cemento_gr})$

Las nanopartículas de TiO_2 dopadas con Ag se usarán en porcentajes de 1%, 2%, 4%, 8% y 10%, referentes al peso del cemento y serán añadidas, y no por sustitución, al material cementante, o al agua, según se vea más favorable, con lo que no será necesario ajustes al a/mC



4.3.4.-Equipo empleado para la elaboración de pastas

- Balanza electrónica de laboratorio.
- Guantes de látex.
- Tazón circular de vidrio templado.
- Pisón de 9 mm de diametro de sección transversal y 12.5 cm de largo.
- 2 espátulas de plástico.
- Moldes para cubos de 2.5 cm.
- Aceite vegetal.
- Recipiente para curado.
- Cal.
- Vaso de precipitado
- Pipeta
- Bomba de pipeta de 10 ml

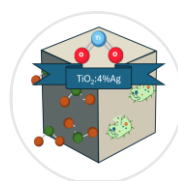
4.3.5.-Producción de cubos de 2.5 cm de pastas cemento-agua adicionadas con nanopartículas de TiO_2 dopadas con Ag

según la mezcla que se vaya a realizar se siguen los siguientes pasos.

1. Se limpia cada molde y se aceita por completo con el aceite vegetal.
2. El laboratorio y materiales deben estar entre los 20 °C y los 27 °C
3. El cemento es depositado en el tazón de vidrio.
4. Se ponen los gramos de las nanopartículas de TiO_2 :4%Ag, que sean necesarias según el porcentaje de nanopartículas que deba tener la mezcla a realizarse, en el agua que se necesitara para la mezcla, menos 10 ml que se deberán reservar.

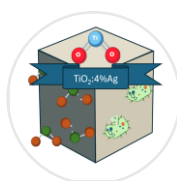
Tabla 11: Cantidades de materiales por mezcla para realizar los especímenes (autoría propia).

Cubos de		Relación agua cemento=	0.6	
% TiO_2 :4%Ag	cubos	ml agua	gr cemento	gr TiO_2 :4%Ag
2%	4	53.64 ml	89.41 gr	1.79 gr
4%	4	53.64 ml	89.41 gr	3.58 gr
6%	4	53.64 ml	89.41 gr	5.36 gr
8%	4	53.64 ml	89.41 gr	7.15 gr
Total	16	214.56 ml	357.63 gr	17.88 gr



5. El vaso de precipitado se pone en un desmembrador sónico Fisherbrand™ FB505 a 20kHz con una amplitud de 40%, durante 5min.
6. Se vierte el agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ al cemento en el tazón, de manera lenta, sin salpicar y revolviendo al mismo tiempo,
7. Una vez que se haya terminado de poner el agua del vaso de precipitado con las nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ en el cemento, se procede a usar los 10 ml de agua que fueron reservados para que con ayuda de una pipeta y una bomba de pipeta de 10 ml, se viertan de manera estratégica los 10 ml de agua en el vaso de precipitado para remover cualquier rastro visible de las nanopartículas y se viertan en la mezcla.
8. La mezcla se revuelve con las espátulas de plástico, hasta obtener una mezcla homogénea, que no contenga partículas de cemento no hidratadas y tampoco grumos.
9. Se vierte en los moldes en capas de 15 mm de espesor y se apisonan 30 veces por capa, 20 en sentido horario y 10 en sentido antihorario, alternando entre cada 10 golpes el sentido.
10. Se enrasa los moldes con el pisón y se procede a la vibración de cada molde, levantando cada orilla a una altura de 2.5 cm y se deja caer, se repite tres veces y se procede a hacer lo mismo del otro lado del molde, se hace el vibrado con todos los moldes después de su enrasado.
11. Se deja reposando los moldes en una superficie nivelada y techada durante 24 h.
12. Al cumplir las 24 h se desmoldan los especímenes
13. Se etiquetan cada espécimen con la siguiente información mínima, número de espécimen, % de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$, relación a/mC y fecha.
14. Los especímenes se dejan curando en un recipiente con agua con cal.

Estos especímenes serán usados para pruebas que puedan medir sus capacidades de degradación de contaminantes y sus capacidades para inhibir los microorganismos, además de pruebas de caracterización de los mismos con métodos no destructivos.



4.3.6.-Obtención de discos de pasta cemento-agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ mediante mecanización en dos etapas, obtención de cilindro y seccionado transversal

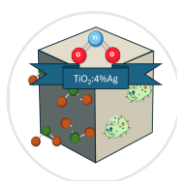
Para las pruebas con microorganismos es necesario obtener de los cubos de pasta cemento-agua con $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ discos adecuados para ponerlos en cajas de Petri, y en tubos de ensayo. Con lo que se siguió el siguiente procedimiento

1. Se ponen el cubo de pasta cemento-agua con $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ en un soporte para taladros.
2. El cubo es fijado de manera que no se pueda mover.
3. Se pone una broca saca corazones, o broca de corona con diamante de 22 mm en el taladro.
4. El taladro es sujetado en el soporte y se procede a perforar el cubo para la extracción de un cilindro de 18 mm de diámetro.
5. El cilindro es recubierto de cinta masking y marcado los cortes que se harán, también se marca el número de disco que será.
6. El cilindro es puesto en un soporte para amoladora de 4 ½' y se sujeta para evitar su movimiento.
7. A la amoladora se le pone un disco de corte de diamante de 2 mm
8. Se procede a cortar el cilindro obteniendo 4 discos de cada cilindro con un espesor entre los 2 mm y los 4 mm y un diámetro de los discos de 18 mm.

4.3.7.-Elaboración de placas de pasta cemento-agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ mediante mecanización.

En las pruebas de degradación de contaminantes es necesario obtener de los cubos de pasta cemento-agua con $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ placas adecuadas para poner en el reactor a usar para las pruebas. Con lo que se siguió el siguiente procedimiento

1. El cubo es recubierto de cinta masking y marcado los cortes que se harán, también se marca el número de placa que será.
2. El cubo es puesto en un soporte para amoladora de 4 ½' y se sujeta para evitar su movimiento.
3. A la amoladora se le pone un disco de corte de diamante de 2 mm
4. Se procede a cortar el cubo obteniendo 4 placas de cada cubo con un espesor entre los 3 mm y los 4 mm, siendo una placa cuadrada de 1 plg.



4.3.8.-Elaboración de esquirlas de pasta cemento-agua con nanopartículas de TiO_2 :4%Ag mediante mecanización.

Para las pruebas de comprobación de degradación de contaminantes por parte de las pastas cemento-agua es necesario hacer esquirlas que puedan pasar por el orificio de entrada de un tubo de ensayo de 10 ml, con lo que usando los restos de los cubos para hacer los discos se procederá a romper los restos en esquirlas que se puedan introducir en los tubos de ensayo. Con lo que se optó por el siguiente procedimiento.

1. Usando un mortero se procedió a romper los restos de cada cubo para obtener esquirlas de un tamaño apropiado.
2. Las esquirlas fueron puestas en tubos de ensayo según el porcentaje de nanopartículas que tuvieran.

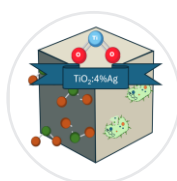
4.4.-Pruebas de inhibición de microorganismos, usando E. coli

Para las pruebas de inhibición de microorganismos se uso a E. coli como microorganismo a analizar.

4.4.1.-Comprobación de la capacidad de inhibición de las nanopartículas de TiO_2 :4%Ag.

Esta prueba se hace para demostrar que efectivamente las nanopartículas de TiO_2 :4%Ag son capaces de inhibir microorganismos, usando la técnica del halo de inhibición[51–53]. El material empleado fue el siguiente:

- 3 cajas de Petri desechables.
- Agar Mueller-Hinton.
- Ampicilina de 50 $\mu\text{g/ml}$.
- Autoclave.
- Película plástica transparente.
- Pinzas.
- Mechero de Bunsen.
- 0.0834g de nanopartículas de TiO_2 :4%Ag (son las nanopartículas que aproximadamente tiene un disco de pasta cemento-agua con 8% de nanopartículas de TiO_2 :4%Ag).
- Rector para reacciones fotocatalíticas.



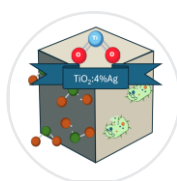
El procedimiento se hace en una campana estéril con el mechero de Bunsen encendido y trabajando cerca de él; pero de manera adecuada y segura, el procedimiento es el siguiente:

1. El instrumental junto con el agar Mueller-Hinton se esterilizan a 120 °C por una hora en el autoclave.
2. En el tubo de ensayo con caldo Mueller-Hinton se procede a introducir la E. coli para su adecuada dispersión y reproducción en el medio líquido que es el caldo.
3. El agar Mueller-Hinton se vierte en las cajas de Petri desechables y se espera su consolidación.
4. A 3 cajas de Petri con agar Mueller-Hinton se inocularon con una siembra masiva, con el caldo Mueller-Hinton con la E. coli.
5. Las cajas se organizaron de la siguiente manera:
 - 1 caja de control positivo con 50 microlitros de ampicilina.
 - 1 caja de control negativo sin nada en ella (solo la siembra masiva de E. Coli).
 - 1 caja con 0.0834g de nanopartículas de TiO₂:4%Ag depositadas en el centro de la caja de Petri.
6. Las 3 cajas se meten al reactor de reacciones fotocatalíticas por 24 h y a temperatura ambiente estable de 20-25 °C.
7. Pasadas las 24 h se obtienen los resultados.

4.4.2.-Prueba de inocuidad de los discos de cemento-agua con nanopartículas de TiO₂:4%Ag.

Esta prueba es para confirmar la viabilidad de la técnica de esterilización de los especímenes con nanopartículas de TiO₂:4%Ag. El equipo y material empleado fue el siguiente:

- 3 cajas de Petri desechables.
- 1 caja de Petri de vidrio.
- Agar Mueller-Hinton.
- Autoclave.
- Horno de calor seco.
- Película plástica transparente.
- Pinzas.



- Mechero de Bunsen.
- Especímenes (los discos de pasta cemento-agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$).
- Incubadora

los procedimientos se hacen en una campana estéril con un mechero de Bunsen encendido para mantener ese ambiente estéril por completo. El procedimiento fue el siguiente:

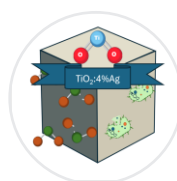
1. Los especímenes se estilizaron a 200 °C en un horno de calor seco por 2 h en una caja de Petri de vidrio.
2. Se deja enfría la caja y se pone una película plástica para sellarla y evitar que el aire pueda entrar a los especímenes.
3. El instrumental se esteriliza a 120 °C por una hora en el autoclave.
4. Se escoge al azar 3 discos de pasta cemento-agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$.
5. En cada una de las tres cajas se pone un disco.
6. Las 3 cajas se meten a una incubadora por 24 h y a temperatura estable de 37 °C.
7. Pasadas las 24 h obtendremos los resultados.

Si no hay microorganismos visibles significa que los especímenes fueron esterilizados adecuadamente y la técnica usada fue apropiada.

4.4.3.-Pruebas de la contribución independiente de la Ag en las nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ para la inhibición de microorganismos en el laboratorio.

Esta prueba es para confirmar que la Ag del dopaje no tiene efectos de inhibición de microorganismos de manera apreciable o considerable, independiente del TiO_2 . Los procedimientos se hacen en una campana estéril con un mechero de Bunsen encendido si es necesario. El material y equipo empleado fue el siguiente:

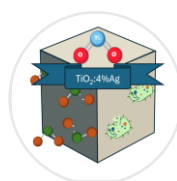
- 17 cajas de Petri desechables.
- 1 caja de Petri de vidrio.
- Agar Mueller-Hinton.
- 1 tubo de ensayo de 10 ml con 4 ml de caldo Mueller-Hinton.



- E. coli.
- Autoclave.
- Horno de calor seco.
- Película plástica transparente.
- Cloro.
- Pinzas.
- Isopos.
- Mechero de Bunsen.
- Especímenes (los discos de pasta cemento-agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$).
- Ampicilina de 50 $\mu\text{g/ml}$.
- Incubadora

El procedimiento fue el siguiente:

1. Los especímenes se esterizaron a 200 °C en un horno de calor seco por 2 h en una caja de Petri de vidrio.
2. Se deja enfriar la caja y se pone una película plástica para sellarla y evitar que el aire pueda entrar a los especímenes.
3. El instrumental junto con el agar Mueller-Hinton se esterilizan a 120 °C por una hora en el autoclave.
4. En el tubo de ensayo con caldo Mueller-Hinton se procede a introducir la E. coli, para su adecuada dispersión y reproducción en el medio líquido que es el caldo.
5. El agar Mueller-Hinton se vierte en las cajas de Petri desechables y se espera su solidificación.
6. A 17 cajas de Petri con agar Mueller-Hinton se inocularon con una siembra masiva, con el caldo Mueller-Hinton con la E. coli.
7. Las cajas se distribuyeron de la siguiente manera:
 - 1 caja de control positivo con 50 microlitros de ampicilina.
 - 1 caja de control negativo sin nada en ella (solo la siembra masiva de E. Coli).



- 3 cajas con un disco de pasta cemento-agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\text{Ag}$ cada una, por cada porcentaje, siendo: Testigo, 2%, 4%, 6% y 8% de nanopartículas, en total 15 cajas.
- 8. Las 17 cajas se meten a una incubadora por 24 h y a temperatura estable de 37 °C.
- 9. Pasadas las 24 h se obtienen los resultados.

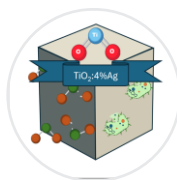
4.4.4.-Pruebas de reacciones fotocatalíticas para la inhibición de microorganismos en el laboratorio.

Esta prueba es para saber la capacidad de los especímenes de pastas cemento-agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\text{Ag}$ para inhibir a los microorganismos, en este caso la E. coli, para lo cual se necesita estos materiales y equipo:

- 4 cajas de Petri desechables.
- 1 caja de Petri de vidrio.
- Agar Mueller-Hinton.
- 1 tubo de ensayo de 10 ml con 4 ml de caldo Mueller-Hinton.
- E. coli.
- Autoclave.
- Horno de calor seco.
- Película plástica transparente.
- Pinzas.
- Isopos.
- Mechero de Bunsen.
- Especímenes (los discos de pasta cemento-agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\text{Ag}$).
- Ampicilina de 50 µg/ml.
- Reactor para reacciones fotocatalíticas.

El procedimiento fue el siguiente:

1. Los especímenes se estilizaron a 200 °C en un horno de calor seco por 2 h en una caja de Petri de vidrio.
2. Se deja enfriar la caja y se pone una película plástica para sellarla y evitar que el aire pueda entrar a los especímenes.



3. Mediante un autoclave se esteriliza todo el instrumental y el agar Mueller-Hinton, a una temperatura de 120 °C por 1 h.
4. En un tubo de ensayo con caldo Mueller-Hinton se introduce la E. coli, para su apropiada dispersión y reproducción en el medio líquido.
5. El agar Mueller-Hinton es vertido en las cajas de Petri desechables y se deja reposar hasta su solidificación.
6. A las 4 cajas de Petri con agar Mueller-Hinton se inocularon con una siembra masiva, con el caldo Mueller-Hinton con la E. coli.
7. Las cajas se distribuyeron de la siguiente manera:
 - 1 caja de control positivo con 50 microlitros de ampicilina.
 - 1 caja de control negativo sin nada en ella (solo la siembra masiva de E. Coli).
 - 1 caja con un disco de pasta cemento-agua, que no contenga nanopartículas.
 - 1 caja con un disco de pasta cemento-agua con 8% de nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$.
8. Las 4 cajas se meten al reactor para reacciones fotocatalíticas por 24 h y a temperatura estable de 20-25 °C.
9. Pasadas las 24 h se obtienen los resultados [58].

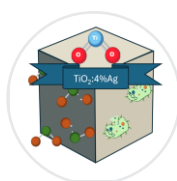
4.5.-Pruebas de degradación de contaminantes usando AM y AA9

Para saber si los especímenes de pastas cemento-agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$, se decidieron usar como contaminantes genéricos al AM y al AA9, debido a su estabilidad y a su comportamiento ya estudiado.

4.5.1.-Reactor para pruebas de reacciones fotocatalíticas de las nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$

Para poder tener un ambiente controlado para pruebas sin variaciones, se decide hacer un reactor para reacciones fotocatalíticas, los materiales para su elaboración son los siguiente:

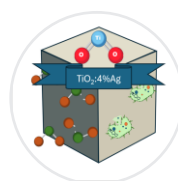
- Aglomerado.
- Bisagras.
- Lámpara UV de analytikjena “UVP UVGL-55”, de 6 watt y dos focos de 254 nm (UV-C) y 365 nm (UV-A).



- Agitador de placas “Thermo Scientific™ SP88854100”.
- Agitador magnético.
- Vaso de precipitado de 400 ml.
- Papel aluminio.
- Caja acrílica de 5 cm*5 cm*4 cm, sin tapa de acrílico.

Para la elaboración del reactor de reacciones fotocatalíticas se realizaron los siguientes pasos:

1. Se hace con el aglomerado y las bisagras una caja, la cual debe tener las siguientes medidas de base 21 cm*30 cm y una altura de 31.5 cm, debe tener una tapa de 30 cm*31.5 cm y tener una abertura para la lampara UV en la parte superior de la caja, la cual debe tener elementos de aglomerados a sus lados para evitar filtraciones de los rayos UV.
2. La caja se forra en todo su interior de papel aluminio.
3. La caja ya forrada se pone encima del agitador de placas.
4. La lampara UV se sitúa en su lugar, en la parte superior de la caja en la abertura hecha para la misma, la lampara debe estar con el interruptor de esta en apagado y no debe estar conectada a la fuente de electricidad (se debe tener cuidado con la lampara UV por ser potencialmente nociva si no se usa adecuadamente).
5. A la caja acrílica sin tapa, se le realizan perforaciones en su base, para permitir el ingreso de líquidos desde debajo de la caja
6. La caja acrílica debe tener orificios en las caras de los lados para que con papel aluminio se realicen soportes para que la caja se pueda acomodar en un vaso de precipitado, a esta pieza se la llamara **soporte para especímenes**.
7. A un vaso de precipitado se lo agrega un agitador magnético y una solución líquida del contaminante genérico a tratar.
8. Se pone el soporte de especímenes en el vaso de precipitado de tal manera que quede por encima del agitador magnético y el espécimen quede por completo debajo de la superficie del líquido con el contaminante genérico.
9. Se pone el espécimen a observar en el soporte para especímenes.
10. Se introduce el vaso de precipitado con el soporte de especímenes dentro de la caja, lo más centrado posible, según el agitador de placas.



11. Se cierra la tapa procurando que este perfectamente sellado y no deje escapar rayos UV.
12. Se procede a conectar y activar la lampara UV.
13. Las reacciones fotocatalíticas ya tienen lo necesario para que sucedan dentro del reactor, se deberán tomar lecturas de la posible degradación del contaminante cada cierto intervalo de tiempo.
14. Según el tiempo de la prueba y la toma de lecturas de cada intervalo de tiempo, se obtendrán resultados usando un UV-VIS HACH DR/4000U spectrophotometer, tomando una muestra de la solución con el contaminante del vaso de precipitado y medir la concentración del contaminante con el UV-VIS.

El UV-VIS hach DR/4000U spectrophotometer medirá la absorbancia y usando la ley de Lambert-Beer, se podrá ver si hay o no degradación de los contaminantes a inspeccionar.

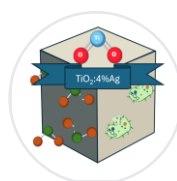
4.5.2.-Curva de calibración para los contaminantes genéricos

Esta prueba es para obtener la absorbancia de los contaminantes, y usando la ley de Lambert-Beer, podremos saber la concentración de los contaminantes a probar, los materiales para la prueba son:

- UV-VIS HACH DR/4000U spectrophotometer.
- Soluciones de 10 ppm de AM y AA9, 70 ml de cada solución.
- 21 tubos de ensayo.
- Agua destilada.
- Vaso de precipitado.
- Pipeta de 10 ml.
- Bomba de pipeta de 3 vías.
- Matraz volumétrico de 10 ml.

Para elaborar la curva de calibración se siguen los siguientes pasos:

1. Se toma un tubo de ensayo y se vierte en el 10 ml de agua destilada.
2. El tubo de ensayo del paso 1 se usa para hacer una línea de base con el UV-VIS.



3. Se toma la solución de 10 ppm y se toman 10 ml de ella para ser medida su absorbancia con el UV-VIS.
4. Se determina la longitud de onda con mayor absorbancia para ese contaminante.
5. Una vez determinada la longitud de onda de mayor absorbancia se mide en esa longitud de onda la absorbancia de soluciones de 1-9 ppm.
6. Para hacer soluciones de 1-9 ppm se sigue con el siguiente procedimiento:
 - Se toma “X” ml de la solución de 10 ml.
 - se vierten en el matraz volumétrico y se afora con agua destilada hasta obtener 10 ml.
 - Se pasa a un tubo de ensayo y se mide con el UV-VIS.
 - Se obtiene la absorbancia en la longitud de onda determinada de esa solución de ppm.
 - Con lo que usando 9 ml de la solución de 10 ppm y aforar hasta los 10 ml se obtiene una solución de 9 ppm.
7. Una vez obtenido la absorbancia en la longitud de onda con mayor absorbancia de las soluciones de 1-10 ppm se procede a realizar una gráfica, donde el eje “X” será la concentración y el “Y” la absorbancia.
8. Se verifica que la gráfica muestre una recta perfecta y obtenemos la ecuación de dicha recta.
9. La pendiente de esa recta será la absortividad.

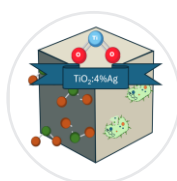
Con lo que se tendrá lo necesario para encontrar la concentración del contaminante a partir de su absorbancia en la longitud de onda de mayor absorbancia del contaminante, usando la ley de Lambert-Beer:

(6)

$$A=abc$$

Donde: A=Absorbancia, a=absortividad, b=Distancia del camino óptico en cm, c=Concentración de la solución

Despejando la concentración y siendo que b es 1 cm, tenemos que “C=A/a”. Esta prueba se hace por triplicado para cada contaminante a revisar, sobre todo si no se



tiene la absorptividad del contaminante y la longitud de onda de mayor absorbancia de este.

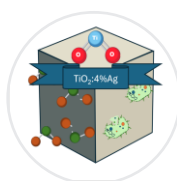
4.5.3.-Comprobación de la capacidad de degradación de contaminantes de las nanopartículas de $\text{TiO}_2\text{:4\%Ag}$

Esta prueba es para demostrar que las matrices cementicias con nanopartículas de $\text{TiO}_2\text{:4\%Ag}$, son efectivamente aptas para degradar contaminantes, usando tanto el AM como el AA9. Para lo cual los materiales/equipos a usar en la prueba son:

- UV-VIS HACH DR/4000U spectrophotometer.
- 13 tubos de ensayo de 10 ml.
- Esquirlas de pastas cemento-agua con 0, 2%, 4%, 6% y 8% de nanopartículas de $\text{TiO}_2\text{:4\%Ag}$, el tamaño de las esquirlas debe ser el apto para pasar por la apertura de un tubo de ensayo de 10 ml.
- 70 ml de solución de 10 ppm de AA9.
- 70 ml de solución de 10 ppm de AM.

El procedimiento de la prueba es el siguiente:

1. Se vierten en 2 tubos de ensayo 10 ml de solución de 10 ppm de AA9 en cada uno.
2. Se vierten esquirlas de pastas cemento-agua con 0, 2%, 4%, 6% y 8% de nanopartículas de $\text{TiO}_2\text{:4\%Ag}$ en tubos de ensayo de 10 ml, un porcentaje distinto en cada tubo, 1 cm^3 aproximadamente de esquirlas en cada tubo.
3. Se vierte solución de 10 ppm del azul ácido en los tubos con esquirlas hasta llenarlos.
4. Se dejan los 5 tubos con esquirlas y 1 tubo con la solución de 10 ppm de azul ácido en un lugar donde reciban rayos del sol de manera directa el mayor tiempo posible del día.
5. El tubo extra de con la solución de 10 ppm de azul ácido se deja en un lugar adecuado, fresco y sin luz.
6. Se vierte 10 ml de agua destilada en un tubo de ensayo de 10 ml y se almacena junto con el tubo del paso **5**.
7. Se observan los tubos de ensayo a intervalos establecidos durante el día, se comparan el tubo de AA9 con el tubo de ensayo resguardado de la luz solar.



8. Una vez que a simple vista las soluciones en los tubos de ensayo con las esquirlas de pastas cemento-agua con 2%, 4%, 6% y 8% de nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ se vean transparentes, comparando con el tubo de ensayo con agua destilada, se puede dar por terminada la prueba, o cuando se haya acabado el tiempo dado para la misma.

Se repiten el procedimiento con el AM.

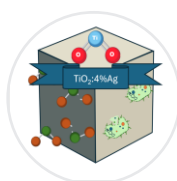
4.5.4.-Pruebas de reacciones fotocatalíticas para la degradación de contaminantes en el laboratorio

Estas son las pruebas en un ambiente controlado, dentro del laboratorio, para verificar si los especímenes, en este caso las placas de pastas cemento-agua con 2%, 4%, 6% y 8% de nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$, son capaces de degradar contaminantes con reacciones fotocatalíticas, para esta prueba se usarán los siguientes materiales y equipos.

- Reactor para reacciones fotocatalíticas
- 150 ml de solución de 10 ppm de AM.
- Placas de pastas cemento-agua con 2%, 4%, 6% y 8% de nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$, una por cada porcentaje.
- UV-VIS HACH DR/4000U spectrophotometer.
- Tubos de ensayo de 10 ml.
- Pipeta de 10 ml.
- Bomba de pipeta de 3 vías.

El procedimiento por seguir se debe hacer con mucho cuidado de la lampara UV del reactor, es mutagénica, el procedimiento es el siguiente.

1. Se asegura que la lampara UV del reactor este apagada antes de conectarla.
2. De los 150 ml de solución de 10 ppm de AM, se toman 10 ml y se vierten en un tubo de ensayo de 10 ml.
3. El tubo de ensayo se mide con el UV-VIS para saber la concentración exacta a la cual se comienza.
4. Los 140 ml restantes se ponen en el vaso de precipitado del reactor junto a un agitador magnético.



5. Se pone la placa en el soporte para especímenes del reactor, cuidando que todo el espécimen este sumergido.
6. Se pone el vaso de precipitado en el reactor, se cierra la tapa de este, asegurando que este bien cerrada.
7. Se enciende el Agitador de placas “Thermo Scientific™ SP88854100” a 450 rpm y no se prende su calefacción.
8. Se enciende la lampara UV.
9. Cada 30 min **se apaga la lampara UV** para sacar el vaso de precipitado y tomar 10 ml de la solución con la pipeta.
10. Se vuelve a poner el vaso de precipitado en el reactor, se prende la lampara UV.
11. Los 10 ml tomados del vaso de precipitado del paso **9** se ponen en un tubo de ensayo para medir su absorbancia con el UV-VIS y obtener su concentración.
12. Se repite los pasos 9-11 hasta acabar el tiempo de la prueba.

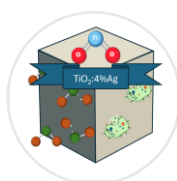
Se observa el cambio de la concentración del contaminante y la gráfica que nos da el UV-VIS para determinar si hay o no degradación del contaminante, esta prueba se repite con el AA9.

5.-ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1.-Resultados del DRX

5.1.1.-Primer resultado del DRX

Se hizo DRX en muestras llevadas desde la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) en el difractómetro de rayos X, RIGAKU Ultima IV de los Laboratorios del IIIER, de la UNICACH. Libramiento Nte. Pte., Caleras Maciel, 29014 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Esto durante una estancia que se hizo del 16 al 27 de Octubre del 2023, La estancia fue lograda gracias al proyecto de Ciencia de frontera (CONAHCYT) CF-2023-G-985, denominado “Concretos y morteros auto degradantes de biota y compuestos contaminantes presentes en la atmósfera, para su aplicación en vivienda digna de interés social, en ciudades medias mexicanas”



Las muestras fueron de nanopartículas de TiO_2 , obtenido a partir de una síntesis de isopropóxido de titanio (IV) ($\text{Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$), con dos variantes

- Usando 0.5 ml agua desionizada.
- Sin usar agua desionizada.

Se obtuvo una gráfica por cada muestra que nos indica los materiales y las fases cristalinas presentes en las muestras, el software nos da los datos de la gráfica en formato Excel y en txt. A continuación, mostramos los resultados que el programa nos dio.

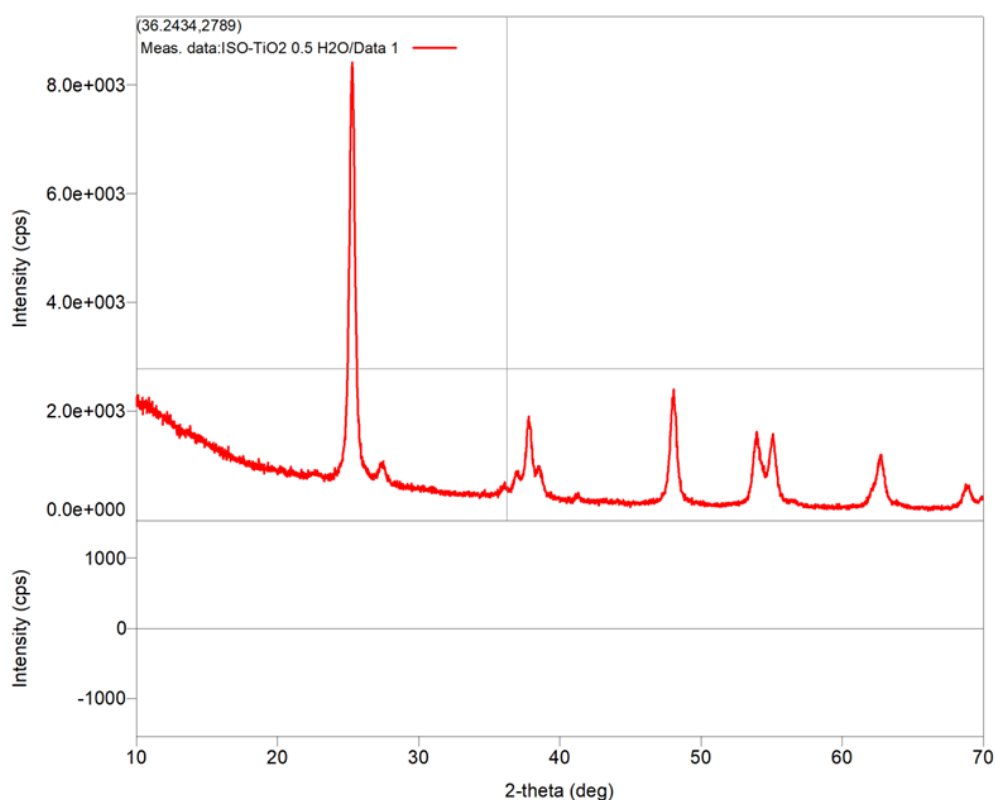
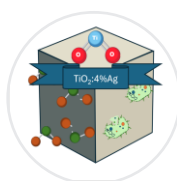


Ilustración 13: Gráfica obtenida por difractómetro de rayos X, RIGAKU Ultima IV de la muestra usando 0.5 ml agua desionizada. Laboratorios del IIIER, 2023 [59].



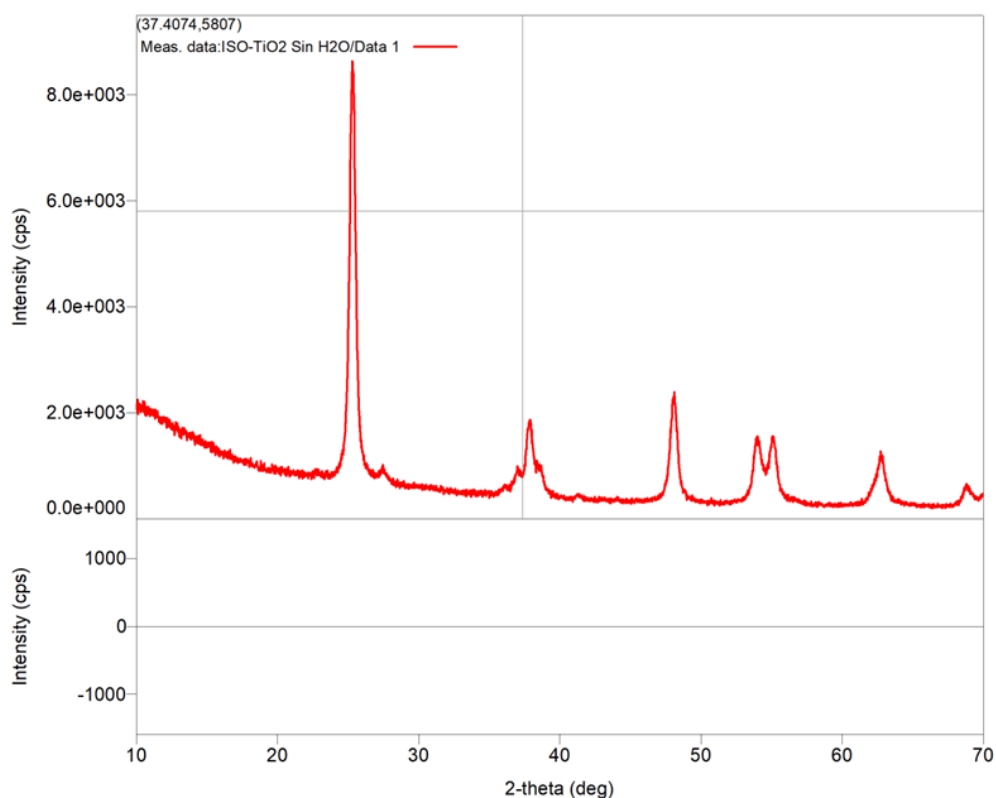
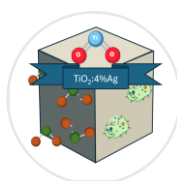


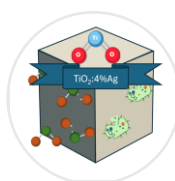
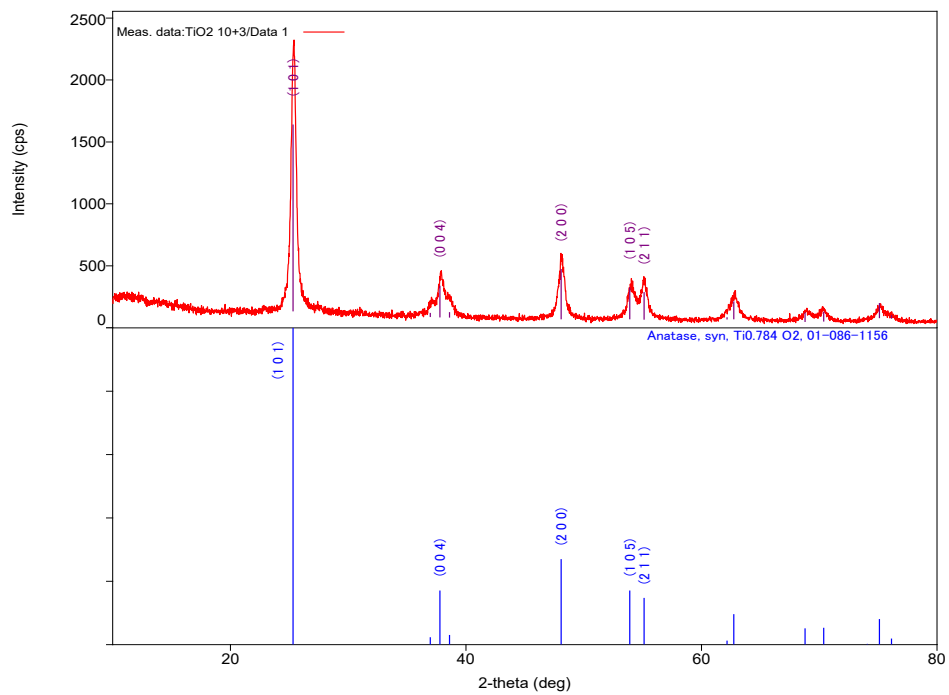
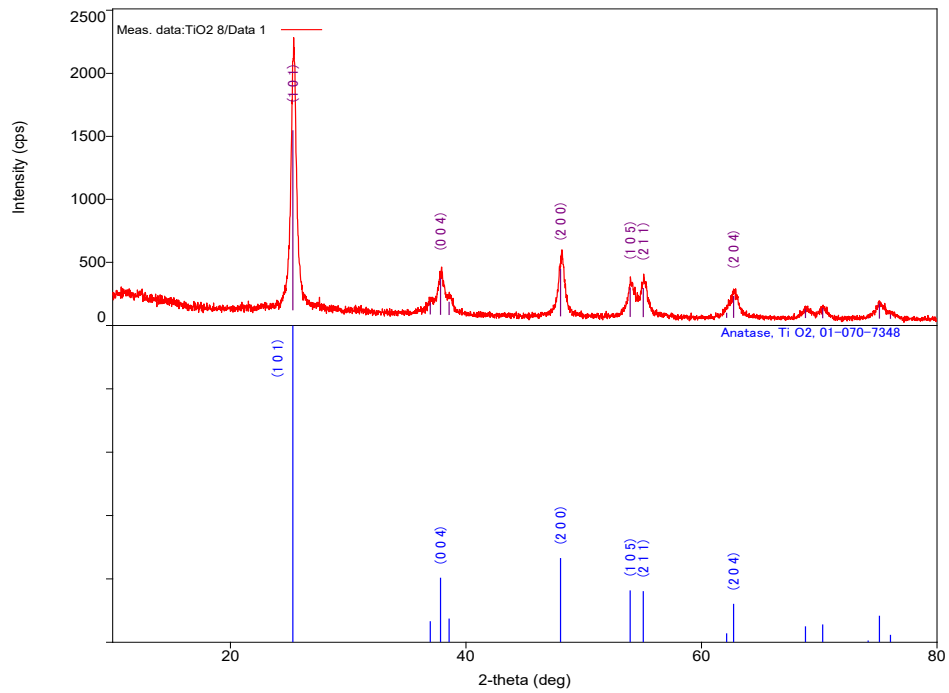
Ilustración 14: Gráfica obtenida por difractómetro de rayos X, RIGAKU Ultima IV de la muestra sin usar agua desionizada. Laboratorios del IIER 2023, [59].

En este primer intento no se logró la fase anatasa del TiO_2 , con lo que se modificó su síntesis.

5.1.2.-Segundo resultado del DRX

Se volvieron a realizar DRX en muestras llevadas desde la UMSNH en el difractómetro de rayos X, RIGAKU Ultima IV de los Laboratorios del IIER, de la UNICACH. Libramiento Nte. Pte., Caleras Maciel, 29014 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. En esta ocasión se obtuvo la fase anatasa deseada.





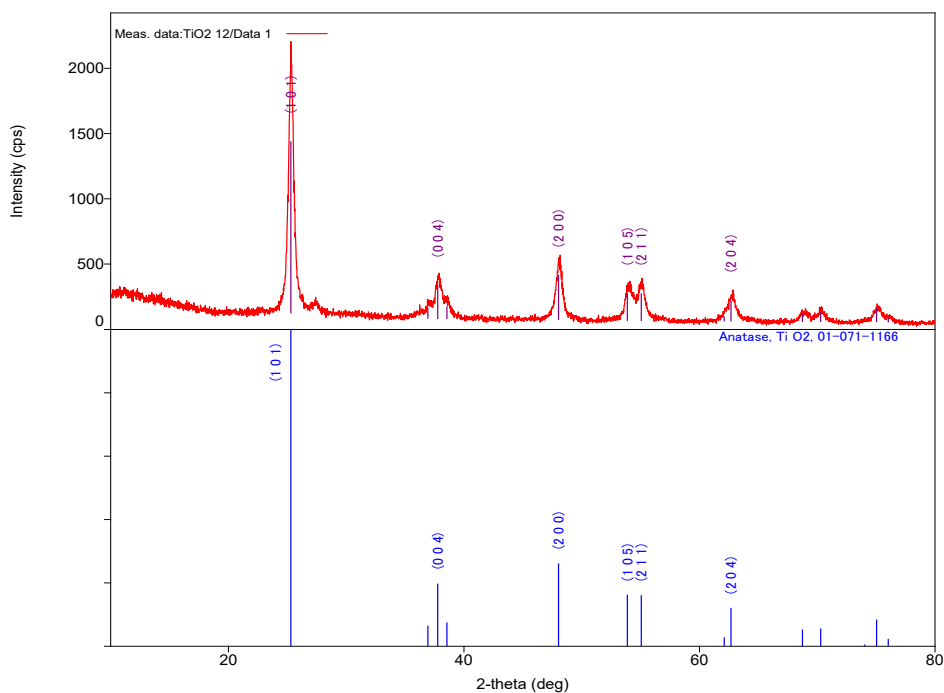


Ilustración 15: Gráfica obtenida por difractómetro de rayos X, RIGAKU Ultima IV. Laboratorios del IIIER, 2024 [59].

Al obtener la fase anatasa se procedió a realizar los especímenes necesarios.

5.2.-Resultados de VPU

Se hizo VPU como se señala en la norma NMX-C-275-ONNCCE-2020 obteniendo los siguientes resultados.

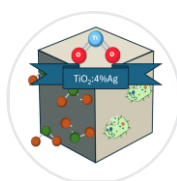


Tabla 12: Resultados de la VPU de los cubos con $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ (Autoría propia).

% TiO_2 :4%Ag	cubos	VPU m/s	seg	VPU m/s promedio	seg promedio
TES	1	2874 m/s	8.7 seg	2946 m/s	8.5 seg
	2	3125 m/s	8.0 seg	D. E.	D. E.
	3	2809 m/s	8.9 seg	138 m/s	0.4 seg
	4	2976 m/s	8.4 seg		
2%	1	3049 m/s	8.2 seg	3040 m/s	8.2 seg
	2	3012 m/s	8.3 seg	D. E.	D. E.
	3	3049 m/s	8.2 seg	19 m/s	0.1 seg
	4	3049 m/s	8.2 seg		
4%	1	3086 m/s	8.1 seg	3078 m/s	8.1 seg
	2	2976 m/s	8.4 seg	D. E.	D. E.
	3	3086 m/s	8.1 seg	78 m/s	0.2 seg
	4	3165 m/s	7.9 seg		
6%	1	3125 m/s	8.0 seg	3079 m/s	8.1 seg
	2	3165 m/s	7.9 seg	D. E.	D. E.
	3	3049 m/s	8.2 seg	84 m/s	0.2 seg
	4	2976 m/s	8.4 seg		
8%	1	3086 m/s	8.1 seg	3025 m/s	8.3 seg
	2	3165 m/s	7.9 seg	D. E.	D. E.
	3	2976 m/s	8.4 seg	127 m/s	0.4 seg
	4	2874 m/s	8.7 seg		

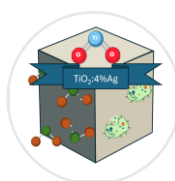
Con los niveles de la desviación estándar que se obtuvieron se puede inferir que usar el desmembrador sónico fue la mejor forma de dispersar las nanopartículas de manera óptima.

5.3.-Resultados de inhibición de la E. Coli Ref.

La inhibición detectada por parte de los especímenes fue de baja o nula de manera visible.

5.3.1.-Comprobación de la capacidad fotocatalítica de las nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$. Contra el E. Coli

La prueba para comprobar que efectivamente las nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ si pueden inhibir microorganismos obtuvo resultados satisfactorios.



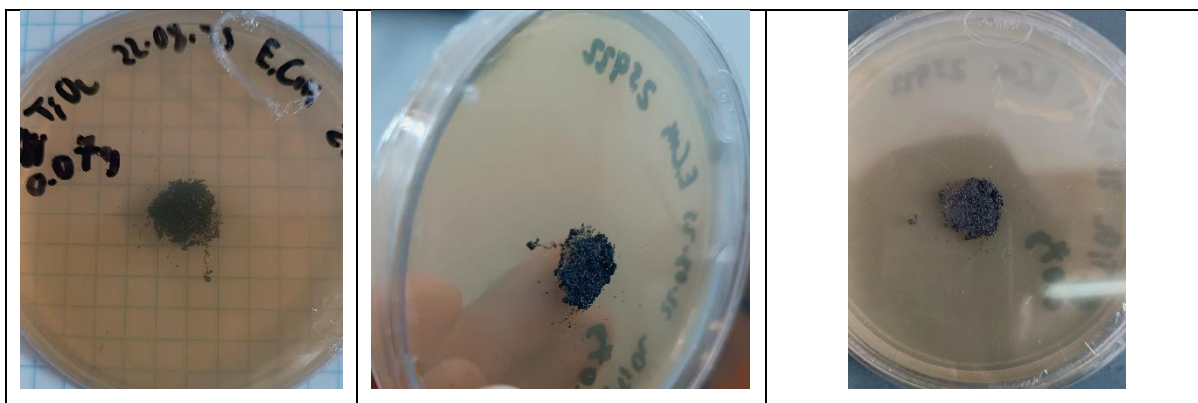


Ilustración 16: Inicio de prueba de inhibición de microorganismos con nanopartículas de TiO_2 :4%Ag (Autoría propia).

En la ilustración 16 se visualiza como en una caja de Petri con agar Mueller-Hinton se pusieron 0.07 g de nanopartículas de TiO_2 :4%Ag, esos gramos son los gramos de nanopartículas que tendría un espécimen de disco de 18 mm de diámetro de pasta cemento-agua con 8% de nanopartículas de TiO_2 :4%Ag.

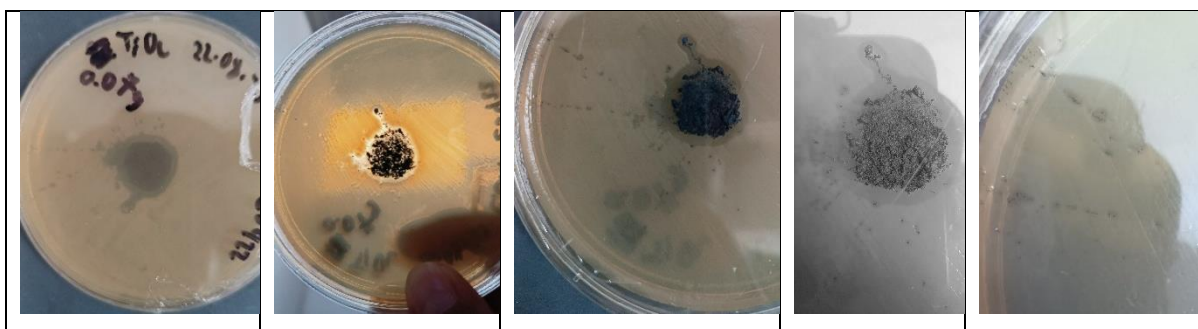
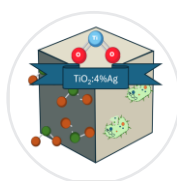


Ilustración 17: Final de prueba de inhibición de microorganismos con nanopartículas de TiO_2 :4%Ag (Autoría propia).

En la ilustración 17 se aprecia como efectivamente las nanopartículas de TiO_2 :4%Ag fueron capaces de inhibir el crecimiento de la E. Coli, presentándose un halo de inhibición alrededor de todas las nanopartículas, incluida aquellas que eran grupos con un menor número de nanopartículas.

5.3.2.-Resultados de la prueba de inocuidad de los de los discos de cemento-agua con nanopartículas de TiO_2 :4%Ag.

Los resultados de la prueba de inocuidad fueron satisfactorios, debido a no detectarse crecimiento de microorganismos después del tratamiento de esterilización realizados en ellos.



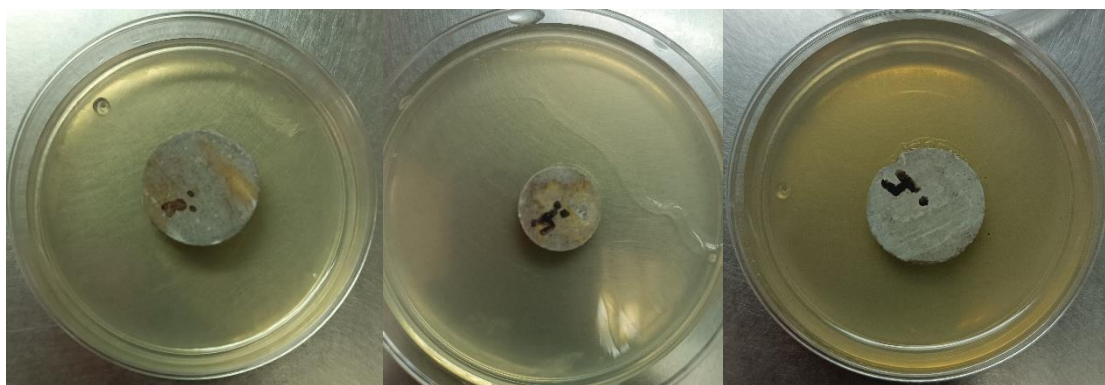


Ilustración 18: Resultados de la prueba de inocuidad a discos de pastas cemento-agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ (Autoría propia).

Podemos ver en la ilustración 18 que efectivamente no hubo crecimientos de microorganismos, con lo que los especímenes si son capaces de ser esterilizados para seguir con las pruebas.

5.3.3.-Resultados de contribución independiente de la Ag en las nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ para la inhibición de microorganismos en el laboratorio.

Los resultados de la inhibición independiente de la Ag en la E. coli fueron los esperados, en la ilustración 19 podemos ver que los microorganismos tuvieron un ambiente idóneo para su reproducción y no se vieron afectados de manera visible por la Ag de los especímenes.

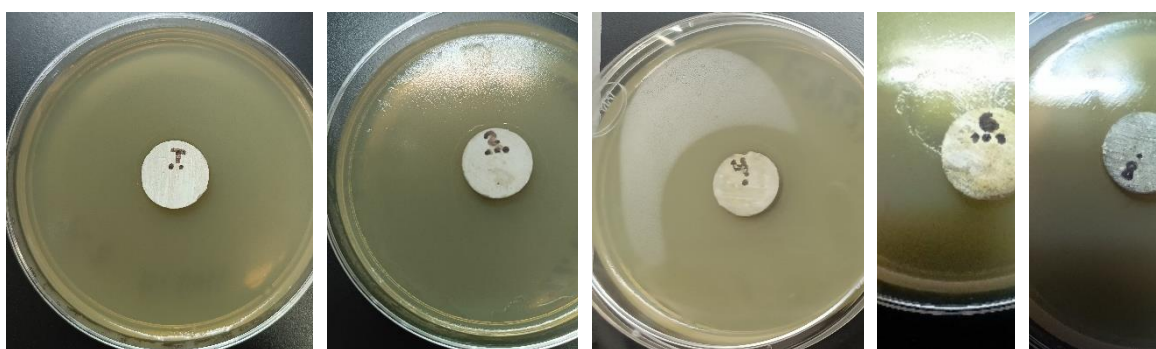


Ilustración 19: Resultados de la inhibición de la Ag en las nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ (Autoría propia).

Podemos afirmar que la Ag no inhibe microorganismo por su propia cuenta, si hay alguna inhibición al momento de hacer reacciones fotocatalíticas será debido a las mismas y no por la Ag de dopaje.

5.3.4.-Resultados pruebas de inhibición E. Coli

Los resultados observados de la inhibición por parte de las nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ fueron infructíferos a simple vista ya que los especímenes no presentaron halo de inhibición como si lo hicieron las nanopartículas solas.

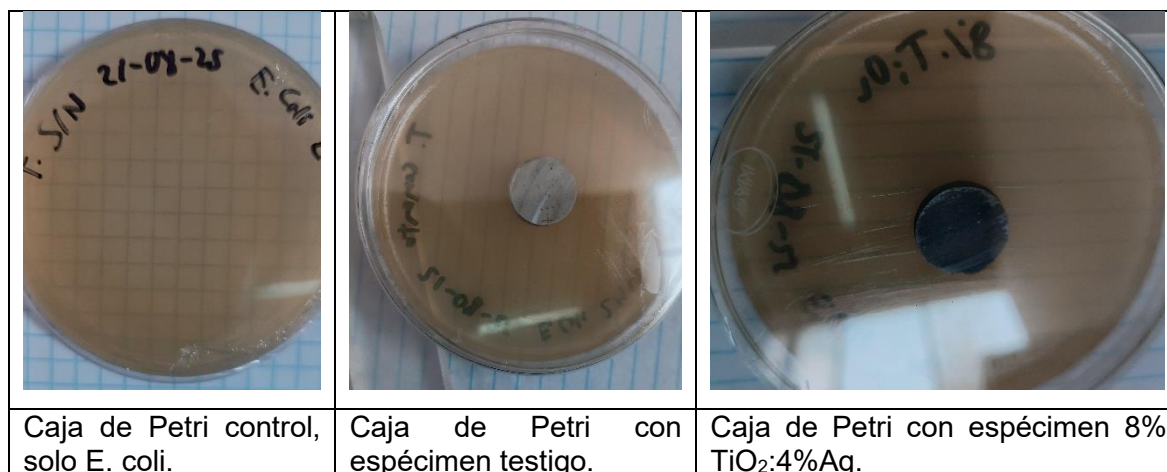


Ilustración 20: Inicio de prueba de inhibición de microorganismos (Autoría propia).

En la ilustración 20 podemos ver algunos de los especímenes al iniciar la prueba de inhibición de microorganismos.

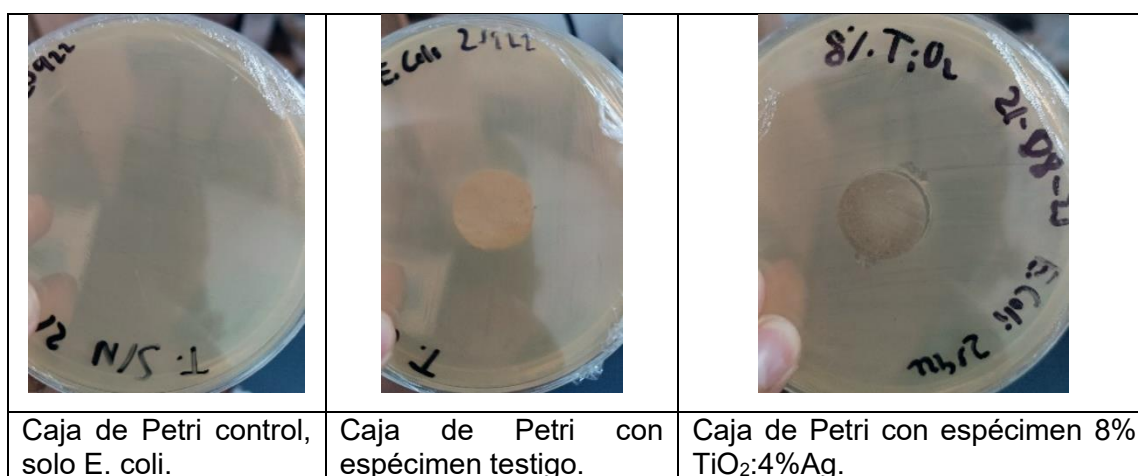
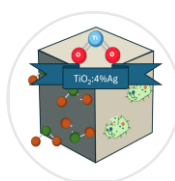


Ilustración 21: Final de prueba de inhibición de microorganismos (Autoría propia).

Se puede observar en la ilustración 21 que no hubo inhibición visible por parte de las matrices con nanopartículas, en la sección de conclusiones se indaga el porqué de este resultado, la pequeña media luna en la matriz de 8% de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ es debido a que se movió un poco el disco, no hay un halo de inhibición.



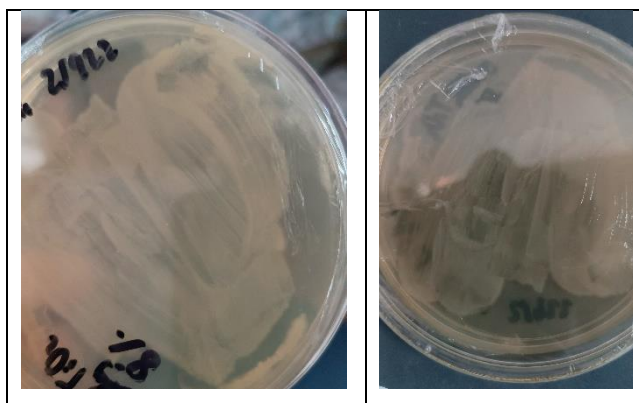


Ilustración 22: Prueba de inhibición no visible de la matriz de 8% de TiO_2 :4%Ag (Autoría propia).

En la ilustración 22 se puede ver el resultado de una prueba extra, se tomó el disco de 8% de TiO_2 :4%Ag y se inoculo con él una caja de Petri con agar, el resultado evidencia que el disco no ocasiono una inhibición de microorganismos, ya que, aunque no fuera visible un halo de inhibición si el disco era inhibidor de microorganismos su superficie no debería tener E. coli y por ende al inocular una caja de Petri nueva no debería haber crecimiento de microorganismos; pero podemos ver que así fue, en conclusiones se explica un posible porque a este resultado desfavorable.

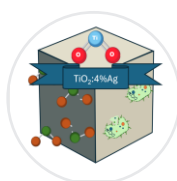
5.4.-Resultados de la degradación del AM y AA9

Se logro ver una degradación de los contaminantes AM y AA9, usando las pastas cemento-agua con TiO_2 :4%Ag

5.4.1.-Comprobación de la degradación del AM y El AA9 con las nanopartículas de TiO_2 :4%Ag

Para poder comprobar que las nanopartículas de TiO_2 :4%Ag eran capaces de degradar contaminantes genéricos se pusieron las nanopartículas en tubos de ensayo junto a soluciones de 10 ppm de los colorantes AA9 y AM para verificar si era posible su degradación.

Se introdujo en los tubos de ensayo los gramos de nanopartículas para hacerla una solución de 10 ppm del contaminante y 2357 ppm de las nanopartículas (las cuales serían las equivalentes a que si introdujéramos los gramos de nanopartículas de una placa de 1 pulgada cuadrada y de 3 mm de grosor de pasta cemento-agua con 8% de nanopartículas de TiO_2 :4%Ag en 140 ml de solución de 10 ppm del contaminante).



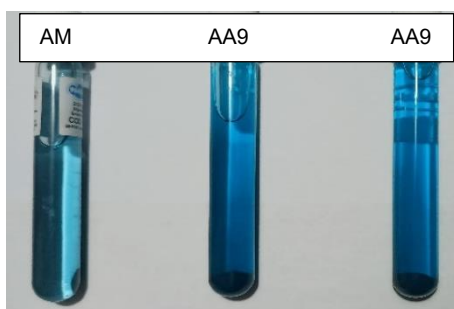


Ilustración 23: Nanopartículas de $\text{TiO}_2\text{:4\%Ag}$, dos tubos de ensayo con AA9 y uno con AM a 6 h del inicio de la prueba 17-09 6:00pm (Autoría propia).

La prueba inicio el 17-09-2025 a las 12:00pm, poniendo los tubos de ensayo en un lugar donde los rayos del sol llegaran directamente a los tubos y siendo monitoreados para ver cambios a simple vista como en la ilustración 23.

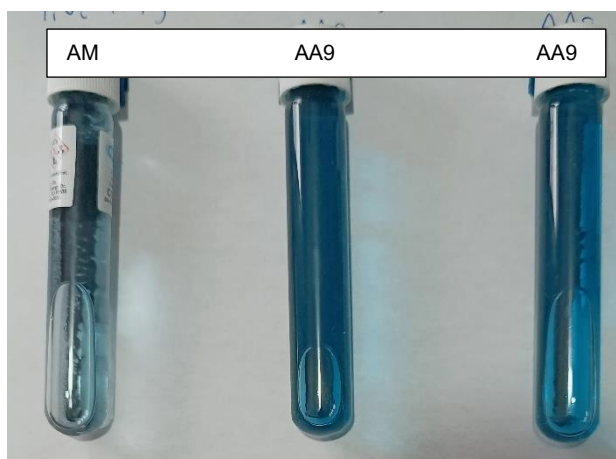


Ilustración 24: Nanopartículas de $\text{TiO}_2\text{:4\%Ag}$, dos tubos de ensayo con AA9 y uno con AM a 18 h del inicio de la prueba 18-09 12:00pm (Autoría propia).

A 18 h en la ilustración 24 vemos que el AM ya se degradado altamente; pero los tubos con AA9 aún no se ven cambios visibles aparentes.

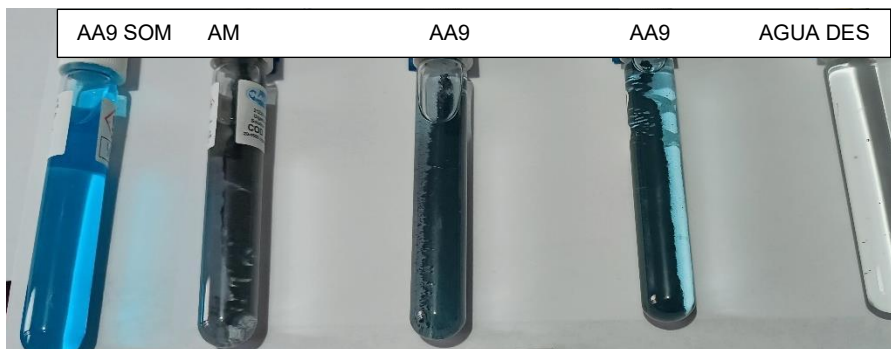
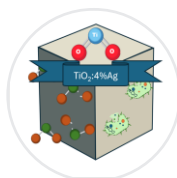


Ilustración 25: Nanopartículas de $\text{TiO}_2\text{:4\%Ag}$, dos tubos de ensayo con AA9 y uno con AM, con tubo control de AA9 y otro de agua destilada a 42 h del inicio de la prueba 19-09 12:00pm (Autoría propia).



A las 42 h se observa en la ilustración 25 que ya el AM fue degradado en casi su totalidad y el AA9 ya presenta en el primer tubo una degradación evidente y en el segundo también; pero menor.

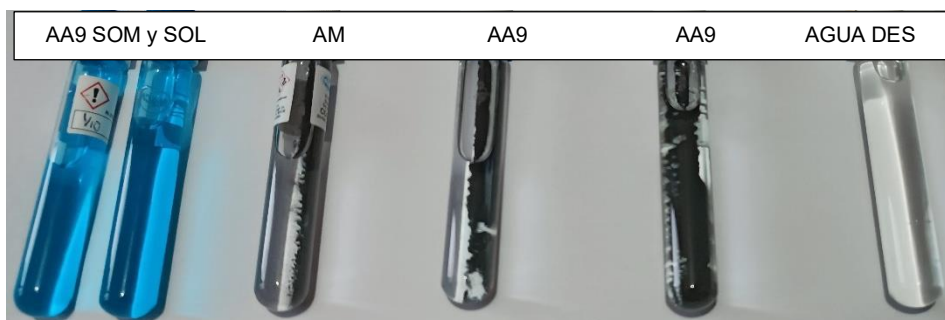


Ilustración 26: Nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$, dos tubos de ensayo con AA9 y uno con AM, con 2 tubos control de AA9 y otro de agua destilada a 66 h del inicio de la prueba 20-09 12:00pm (Autoría propia).

Después de las 66 h del inicio de la prueba se aprecia en la ilustración 26 que el AM esta por completo degradado y el AA9 está visiblemente degradado, apenas distinguiéndose un poco del AA9 aun en el segundo tubo.

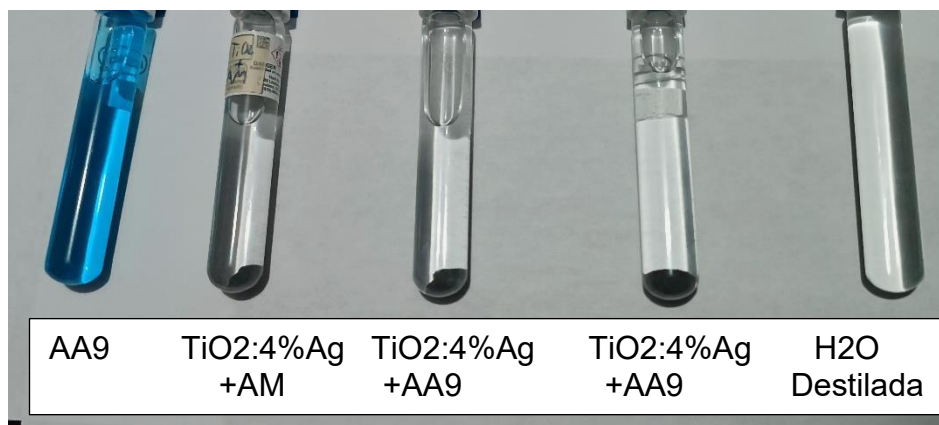


Ilustración 27: Fin de la prueba de degradación del AA9 y AM con las nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ a 90 h (Autoría propia).

Al llegar a las 90 h se decide terminar la prueba, en la ilustración 27 vemos que ambos contaminantes fueron degradados a simple vista por completo, quedando completamente transparentes, con lo que efectivamente las nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ si son capaces de degradar ambos contaminantes.

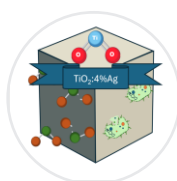


Tabla 13: Concentración final del AM y AA9 al final de la prueba (Autoría propia).

Muestra	ABS	Concentración
8%TiO ₂ :4%AG+AM	0.243	1.0651ppm
8%TiO ₂ :4%AG+AA9 N°1	0.023	0.1726ppm
8%TiO ₂ :4%AG+AA9 N°2	0.014	0.1062ppm

En la tabla 14 se aprecia una bajada de concentración, siendo que inicialmente las 3 soluciones eran de 10 ppm.

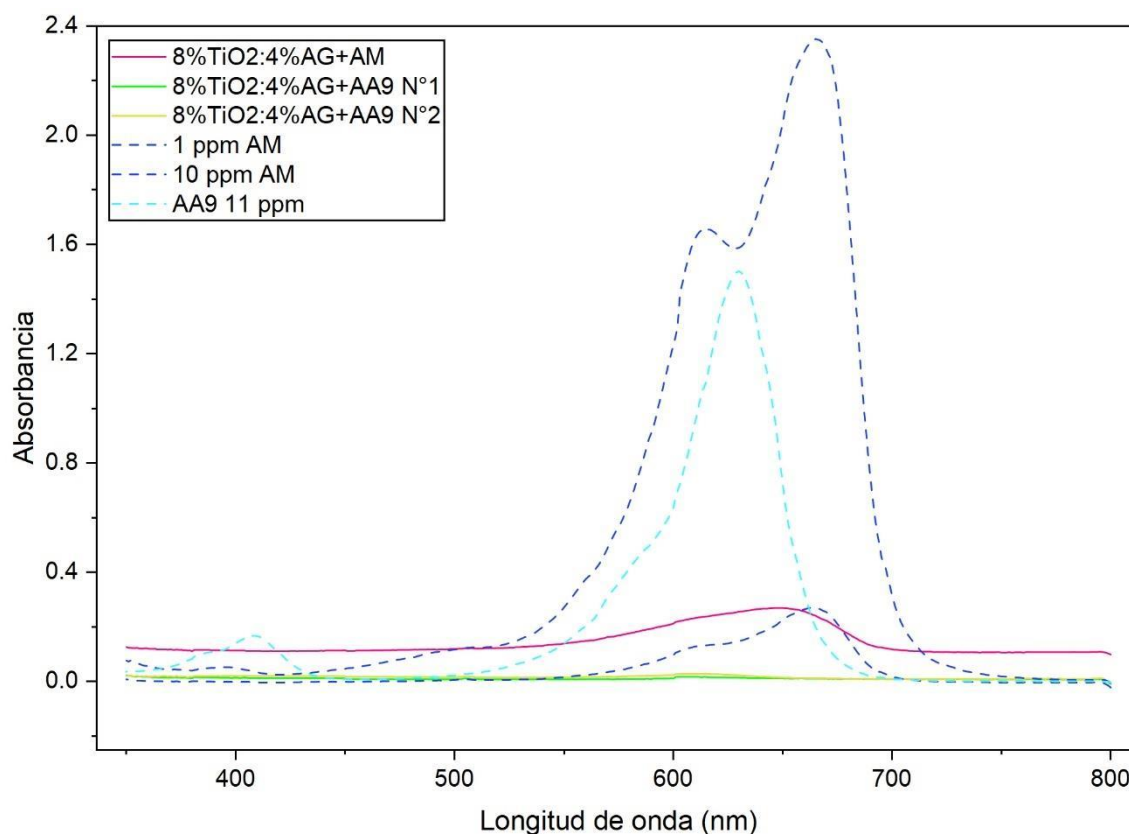
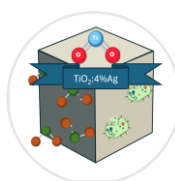


Ilustración 28: Grafica de la absorbancia del AM y AA9 por su degradación con las nanopartículas de TiO₂:4%Ag (Autoría propia).

En la ilustración 28 se observa que las nanopartículas fueron altamente efectivas con el AA9 siendo que cualquier componente del colorante fue degradado hasta tener una muy altamente reducida absorbancia en el espectro de luz visible, el AM fue menos degradado de lo esperado; pero también tuvo una degradación altamente satisfactoria en un 89%.



5.4.2.-Comprobación de la degradación del AM con las esquirlas con nanopartículas de TiO_2 :4%Ag.

La prueba realizada para comprobar la degradación del AM fue usando esquirlas como se menciona en la metodología de esta investigación.

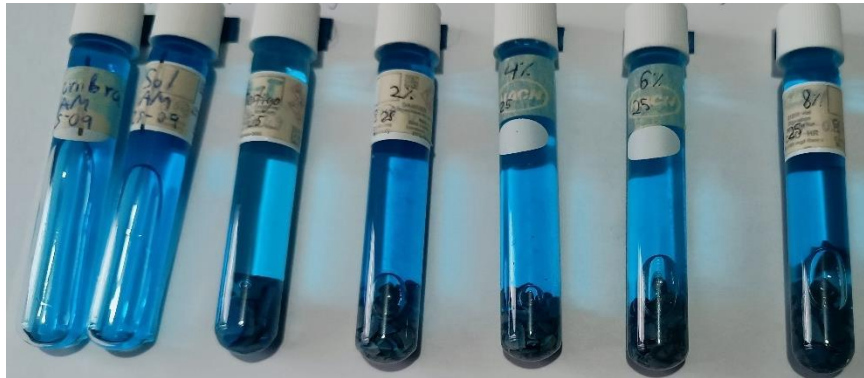


Ilustración 29: Esquirlas de pastas cemento-agua con 0% al 8% TiO_2 :4%Ag y dos tubos de ensayo control con AM al inicio de la prueba (Autoría propia).

En la ilustración 29 podemos ver como estaban inicialmente las esquirlas y dos tubos de ensayo control, todos los tubos fueron puestos en el sol el 26 de septiembre del 2025 a las 12:00pm y revisados a las 5:30pm.

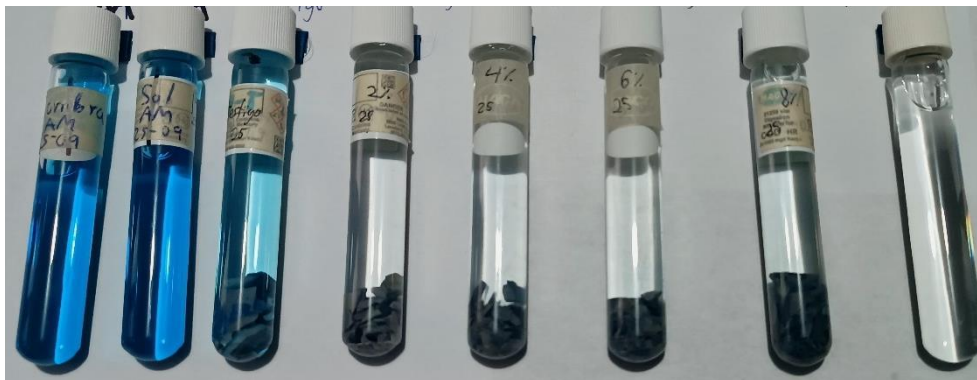
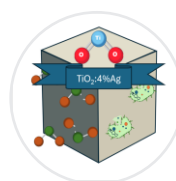


Ilustración 30: Esquirlas de pastas cemento-agua con 0% al 8% TiO_2 :4%Ag y dos tubos de ensayo control al final de la prueba (Autoría propia).

Se mostro a simple vista que, si hubo una degradación del AM, en el tubo con esquirlas testigo sin nanopartículas si bien se ve un cambio en el colorante es debido a absorber y adsorber el mismo.



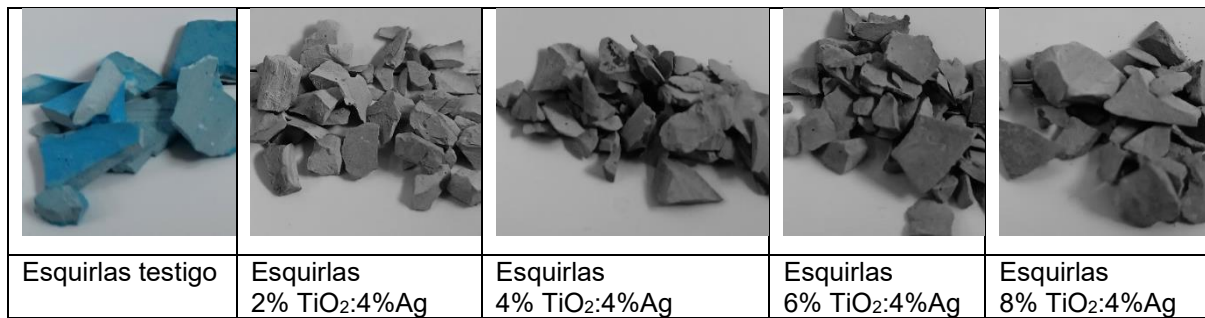


Ilustración 31: Comparación de esquirlas de pastas cemento-agua con 0% al 8% TiO₂:4%Ag al final de la prueba en estado seco (Autoría propia).

En la ilustración 31 podemos ver que efectivamente la matriz sin nanopartículas absorbió y adsorbió el colorante, por eso se tornó su superficie de un tono azulado, mientras que las matrices con nanopartículas tienen una menor cantidad de manchas, casi imperceptibles, con lo que efectivamente podemos afirmar que en 5:30 horas el contaminante fue degradado.

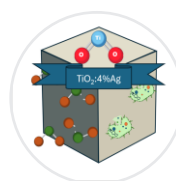
El líquido de los tubos de ensayo fue analizado en un UV-VIS y continuación podemos ver los resultados en la tabla 15.

Tabla 14: Concentración inicial del AM y al final de la prueba (Autoría propia).

Muestra	ABS	Concentración
AM 25-09 SOM INICIO	2.318	10.1456ppm
AM 25-09 SOL INICIO	2.328	10.1881ppm
AM 25-09 SOM FINAL	2.316	10.1379ppm
AM 25-09 SOL FINAL	1.239	5.4221ppm
0% TiO ₂ :4%Ag	0.024	0.1042ppm
2% TiO ₂ :4%Ag	0.004	0.0193ppm
4% TiO ₂ :4%Ag	0.003	0.0116ppm
6% TiO ₂ :4%Ag	0.004	0.0154ppm
8% TiO ₂ :4%Ag	0.006	0.0270ppm

La tabla 15 indica que efectivamente la concentración del AM bajo; pero si bien bajar la concentración es un indicativo de que el colorante fue degradado se debe ver la gráfica que se obtuvo de la medición de la absorbancia por parte del UV-VIS para confirmarlo.

Podemos ver que el sol afectó al AM, con lo que dejar más tiempo en el sol podría ayudar a degradarlo incluso más, pero lo que queremos ver es la capacidad de las nanopartículas en la matriz, así que una vez visto que la solución es transparente a



simple vista en los tubos de ensayo con nanopartículas en sus esquirlas es idóneo acabar la prueba en ese momento.

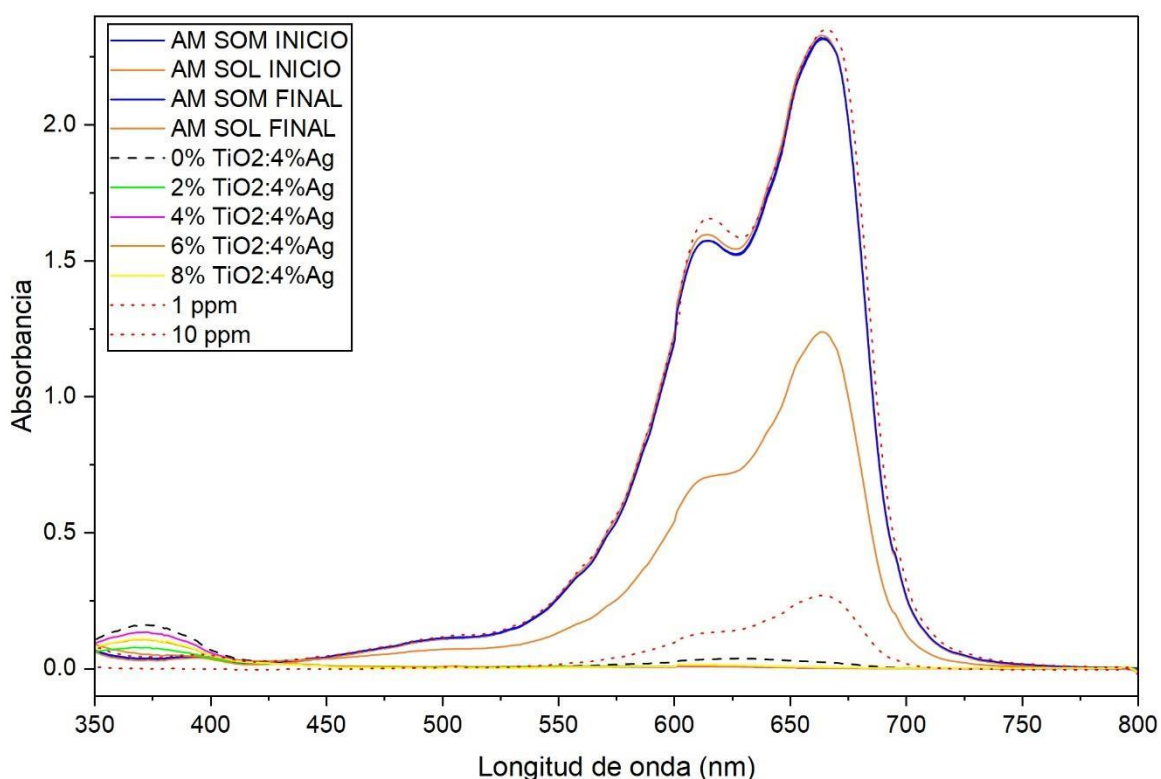
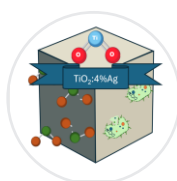


Ilustración 32: Grafica de la absorbancia del AM y su degradación por las matrices con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ prueba (Autoría propia).

Podemos ver en la ilustración 32 que efectivamente hubo una degradación por parte de todos los especímenes con nanopartículas, por parte del testigo se considera que fue mayormente absorción y adsorción del AM; pero si tuvo cierta actividad de degradación del colorante; pero siendo inferior a la matriz con peor resultado, la cual sería la de 8% $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ pero siendo que esa matriz llego a una bajada de concentración y una degradación del 99.73%, la matriz de 4% $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ tuvo el mejor resultado con 99.89%.

5.4.3.-Comprobación de la degradación del AA9 con las esquirlas con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$.

Usando esquirlas y AA9 se comprobó la capacidad de degradación por parte de las esquirlas a ese contaminante genérico; pero a diferencia del AM tardo mas tiempo en hacer efecto, esto debido a que el AM es absorbido por las esquirlas a ser un contaminante con carga positiva; pero el AA9 tiene carga negativa con lo que no es



absorbido, aparte demostró ser mas estable a la luz del sol, con lo que su resistencia a la degradación natural es mucho mayor que el AM.



Ilustración 33: Esquirlas de pastas cemento-agua con 0% al 8% TiO_2 :4%Ag y dos tubos de ensayo control con AA9 al inicio de la prueba (Autoría propia).

En la ilustración 33 vemos los tubos de ensayo que comenzaron las pruebas el 18 de septiembre a las 4:00pm.

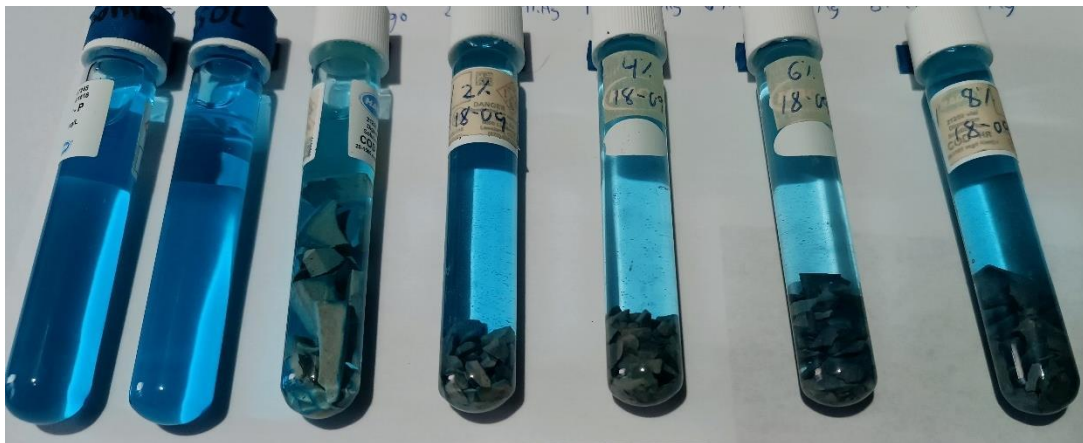
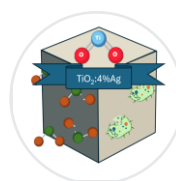


Ilustración 34: Esquirlas de pastas cemento-agua con 0% al 8% TiO_2 :4%Ag y dos tubos de ensayo control con AA9 a 22 h del inicio de la prueba (Autoría propia).

En la ilustración 34 vemos una degradación en el color, predominantemente mas visible en 4 y 6%; pero el AA9 de los tubos control, tanto a la sombra como al sol no parecen presentar una degradación visble.



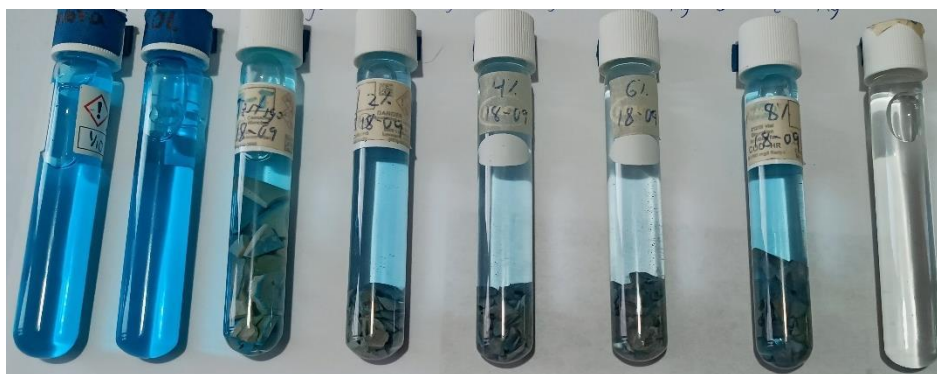


Ilustración 35: Esquiras de pastas cemento-agua con 0% al 8% TiO_2 :4%Ag y dos tubos de ensayo control con AA9 a 44 h del inicio de la prueba (Autoría propia).

Vemos en la ilustración 35 una degradación claramente mayor de los tubos de ensayo con esquiras de 4 y 6% de nanopartículas de TiO_2 :4%Ag.



Ilustración 36: Esquiras de pastas cemento-agua con 0% al 8% TiO_2 :4%Ag y dos tubos de ensayo control con AA9 a 50 h del inicio de la prueba (Autoría propia).

En la ilustración 36 se alcanza a observar que prácticamente los especímenes de 4 y 6% de nanopartículas de TiO_2 :4%Ag se podría considerar llegaron a una degradación casi total.

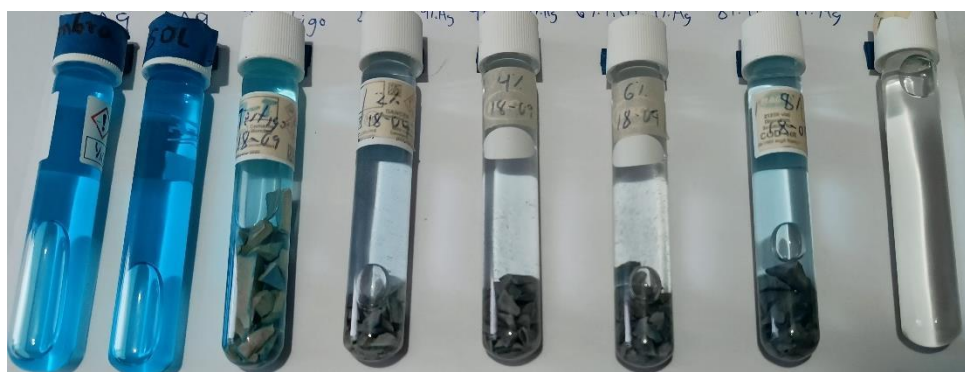


Ilustración 37: Esquiras de pastas cemento-agua con 0% al 8% TiO_2 :4%Ag y dos tubos de ensayo control con AA9 a 68 h del inicio de la prueba (Autoría propia).

Se observa en la ilustración 37 que los especímenes de 4-6% de nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ degradaron el AA9 por completo de manera visible; pero los especímenes de 2 y 8% aun no logran ese cometido, el testigo y los controles de AA9 no muestran degradación visible o mayor absorción y adsorción por parte del testigo.

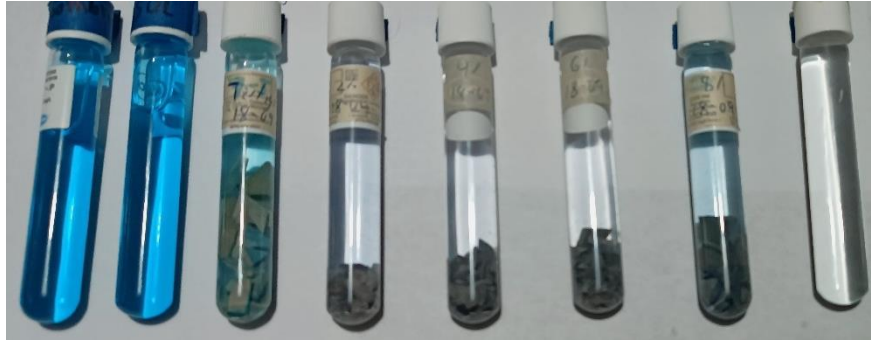


Ilustración 38: Esquiras de pastas cemento-agua con 0% al 8% $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ y dos tubos de ensayo control con AA9 a 74 h del inicio de la prueba (Autoría propia).

A 74 horas del inicio de la prueba podemos ver en la ilustración 38 que el espécimen de 8% $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ es el que mayor tiempo ha tenido que transcurrir para poder degradar el AA9 los otros especímenes ya terminaron.

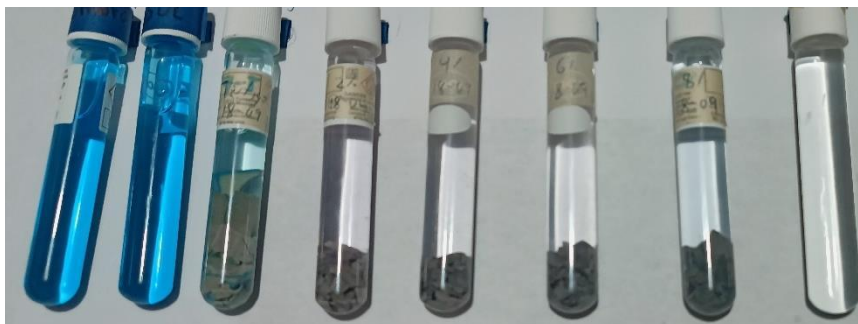


Ilustración 39: Esquiras de pastas cemento-agua con 0% al 8% $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ y dos tubos de ensayo control con AA9 a 98 h del inicio de la prueba (Autoría propia).

A 4 días de iniciada la prueba se llega a la conclusión del que el AA9 es perfecto para pruebas largas y poder ver las etapas de la degradación de un contaminante genérico, sobre todo porque no se degrada naturalmente a pesar de largas jornadas a la intemperie, también vemos en la ilustración 39 que si bien en comparación el espécimen de 8% de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ aun no termina la degradación por completo es idóneo terminar la prueba.

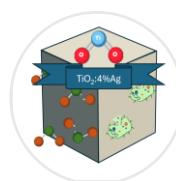




Ilustración 40: Comparación del AA9 que estuvo bajo resguardo y el que estuvo junto a los otros tubos de ensayo bajo el sol (Autoría propia).

Se puede confirmar que no hay cambios visibles en los dos controles de AA9, es un colorante altamente estable como se muestra en la ilustración 40.

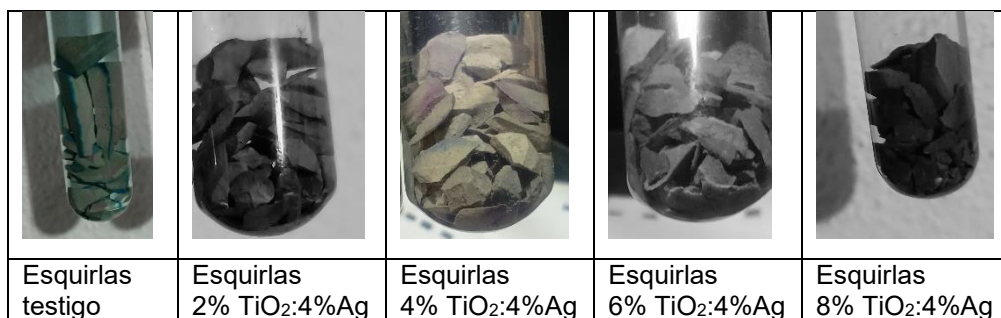


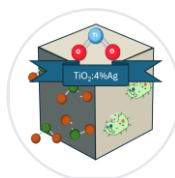
Ilustración 41: Comparación de esquirlas de pastas cemento-agua con 0% al 8% TiO₂:4%Ag al final de la prueba en estado seco (Autoría propia).

Se aprecia en la ilustración 41 que la matriz testigo tuvo alto grado de absorción del colorante, mientras las otras son mínimo o imperceptible a simple vista.

Revisando en el UV-VIS el líquido de los tubos de ensayo tenemos que.

Tabla 15: Concentración inicial del AM y al final de la prueba (Autoría propia).

Muestra	ABS	Concentración
AA9 SOM INICIO	1.501	11.3065ppm
AA9 SOL INICIO	1.500	11.2932ppm
AA9 SOM FIN	1.500	11.2932ppm
AA9 SOL FIN	1.493	11.2401ppm
0% TiO ₂ :4%Ag	0.087	0.6573ppm
2% TiO ₂ :4%Ag	0.006	0.0465ppm
4% TiO ₂ :4%Ag	0.003	0.0199ppm
6% TiO ₂ :4%Ag	0.002	0.0133ppm
8% TiO ₂ :4%Ag	0.016	0.1195ppm



Se puede ver en la tabla 16 que la degradación natural de AA9 es casi nula, a pesar de pasar 98 h, pero los especímenes, si bien con más tiempo de acción, lograron degradar el AA9 de una manera excelente; pero el espécimen de 8% si fue otra vez el de un resultado inferior.

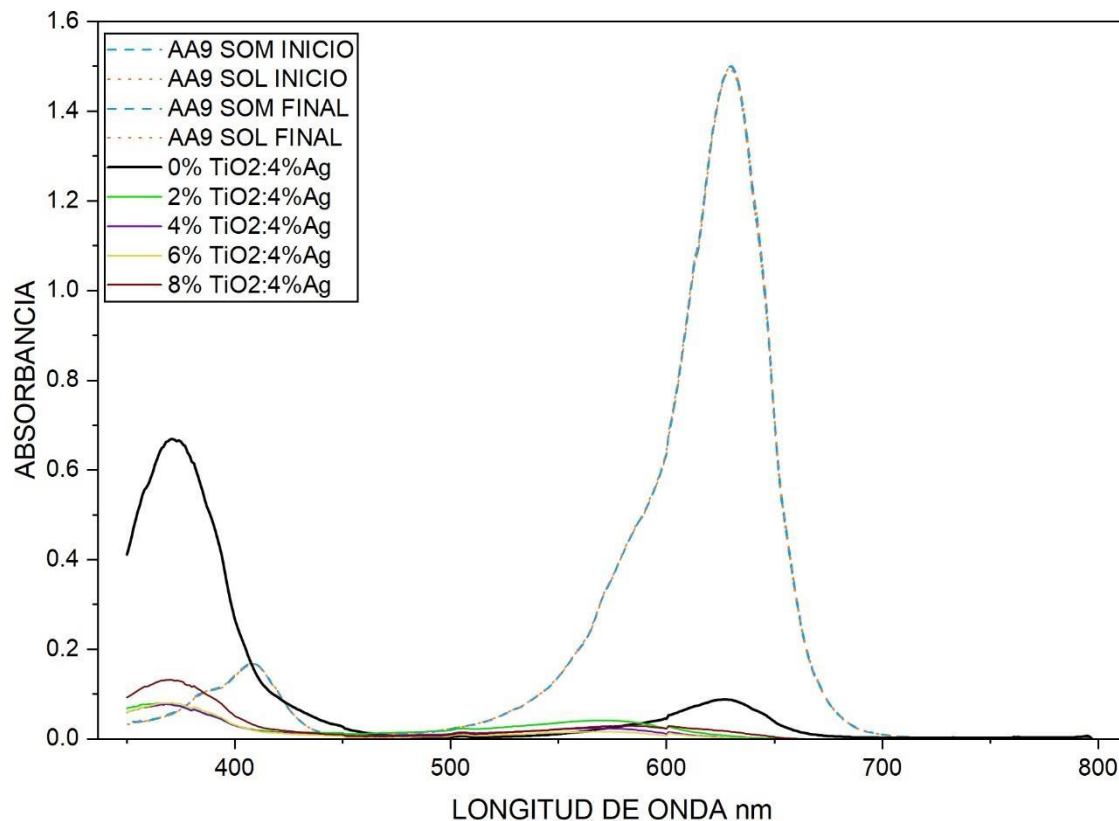
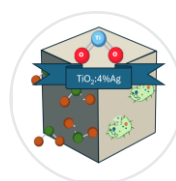


Ilustración 42: Grafica de la absorbancia del AA9 y su degradación por las matrices con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ prueba (Autoría propia).

Se aprecia en la ilustración 42 que efectivamente las matrices de pastas cemento-agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ fueron capaces de degradar el AA9 de manera más que satisfactoria; pero en este caso el testigo parece haber absorbido y adsorbido de una manera menor al AA9, comparando con el AM, y el AA9 que no pudo absorber el testigo se combinó con compuestos de la matriz ocasionando una degradación del colorante; pero de manera menor a con el AM. La degradación del AM y AA9 en todos los especímenes con $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ tuvo una absorbancia que está por debajo de los límites permisibles de la norma NOM-001-SEMARNAT-2021 [60], en cuestión del color verdadero.



5.4.4.-Resultados de la degradación del AM y AA9 en placas de pasta cemento-agua con $\text{TiO}_2\text{:4\%Ag}$

Usando un UV-VIS, se determinó que la degradación en los especímenes con el AM no fue apreciable en el tiempo de duración de la prueba (4 h), la bajada de concentración se puede atribuir a la absorción y la adsorción del contaminante por parte de las matrices cementicias, en la ilustración 43 podemos ver el comportamiento que tuvo el AM en las distintas placas de pastas cemento-agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2\text{:4\%Ag}$.

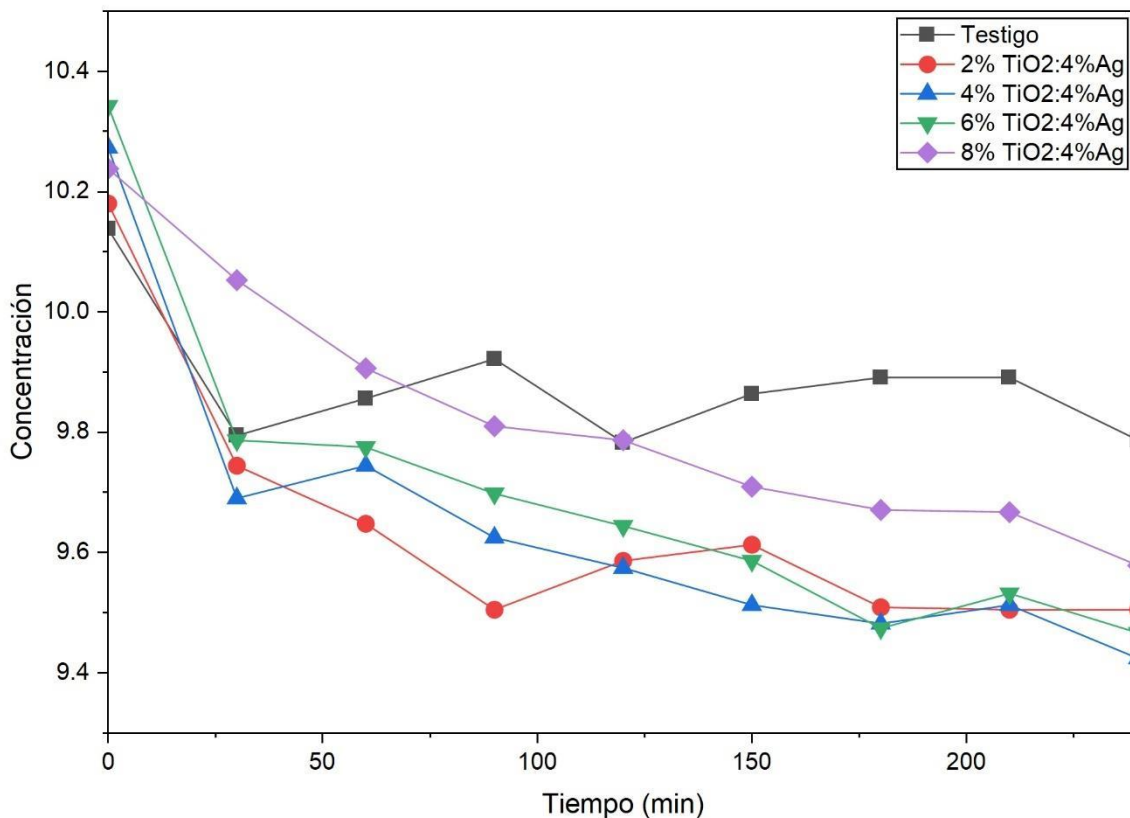
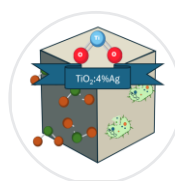


Ilustración 43: Comportamiento de la concentración del AM. (Autoría propia).

Con el AA9 tampoco se vio una degradación apreciable y fue una bajada de concentración incluso menor, en la ilustración 44 se aprecia como el comportamiento del AA9 no indica una degradación en el contaminante.



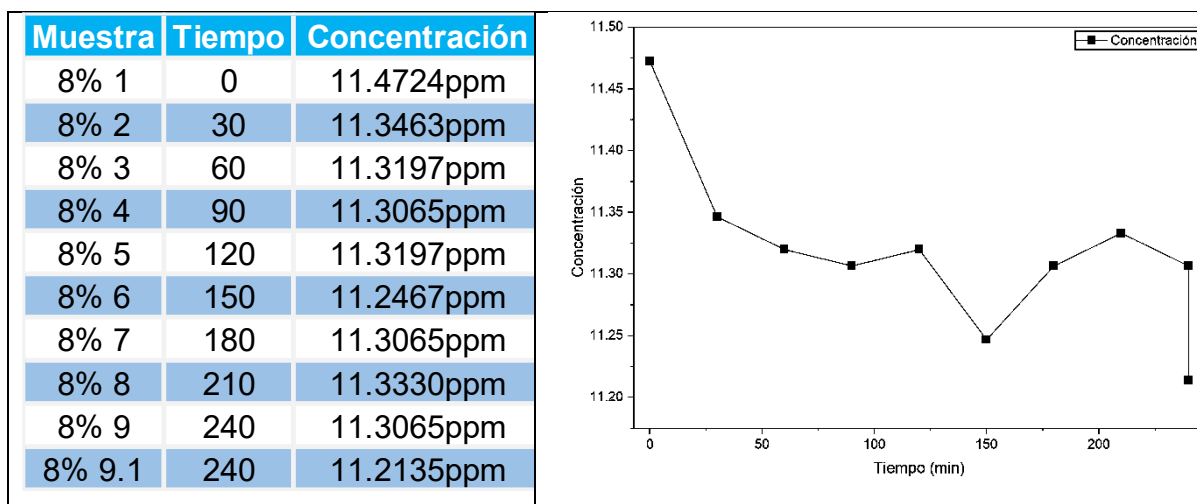
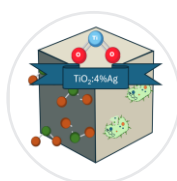


Ilustración 44: Comportamiento de la concentración de la placa espécimen de 8% de TiO_2 :4%Ag en 140 ml de solución de 10 ppm de AA9 (Autoría propia).

6.-CONCLUSIONES

Las nanopartículas de TiO_2 :4%Ag se sintetizaron exitosamente en el Laboratorio de Materiales Ing. Luis Silva Ruelas en la Sección de Materiales Sustentables, lo cual se corroboró mediante DRX, confirmando la fase anatasa. En la caracterización mecánica, las pruebas de VPU y RE permitieron evaluar la integración de las nanopartículas en la matriz cementicia. Los resultados de la VPU pueden indicar una correcta homogeneización y una mejora en la calidad de las muestras en comparación con las muestras testigo, mientras que los valores de la RE resultaron poco confiables debido a las propiedades conductoras de las nanopartículas.

Durante la etapa de inhibición de microorganismos se desarrolló un protocolo experimental propio, en colaboración con el Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, en el Laboratorio de Biotecnología Vegetal, para la caracterización de matrices cementicias con nanopartículas. En este proceso se definieron el tamaño y la forma de las muestras, el procedimiento de obtención, el medio de cultivo (agar Mueller-Hinton) y las condiciones de incubación. Aunque los resultados no mostraron inhibición visible del crecimiento de E. Coli, se identificaron factores críticos, como el espesor de las muestras y el ángulo de irradiación, que influyeron en los resultados. Las nanopartículas por sí solas efectivamente pueden inhibir microorganismos siendo expuestas de luz UV A (365 nm).



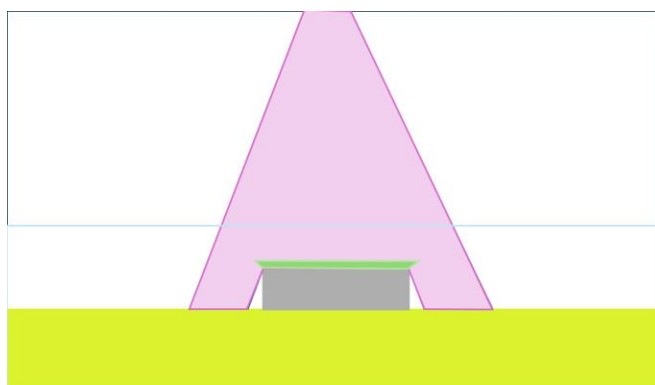
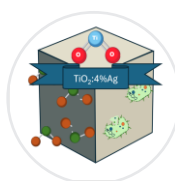


Ilustración 45: Conceptualización del problema de la iluminación no total del espécimen y por ende no tener la capacidad de hacer reacciones fotocatalíticas en la superficie curva del disco de pasta cemento-agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ (Autoría propia).

Asimismo, se conceptualizó y estableció un protocolo para medir la fotocatalisis en pastas cemento-agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$. Se determinaron los parámetros experimentales de las muestras, forma, tamaño y obtención, los tiempos de exposición a la luz ultravioleta (UV) u visible, y se definieron las condiciones de operación del Reactor empleado actualmente en el Laboratorio de Materiales Ing. Luis Silva Ruelas en la Sección de Materiales Sustentables. En este proceso se evaluaron los colorantes AM y AA9, seleccionados por su afinidad electrónica con los especímenes. Las pruebas demostraron que, bajo luz visible, ambos contaminantes fueron degradados de manera significativa: el AM en un periodo de 5.5 horas y el AA9 en 90 horas, mientras que bajo luz ultravioleta (UV) no se registró una degradación apreciable.

Como conclusión general, se logró la incorporación efectiva de nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ en matrices cementicias, dotándolas de propiedades fotocatalíticas. Además, se definieron parámetros experimentales y protocolos estandarizados que fortalecen la base metodológica para futuras investigaciones en materiales cementicios fotocatalíticos. Finalmente, se comprobó la degradación de los colorantes AA9 y AM bajo luz visible, confirmando el potencial de estos materiales como recubrimientos sostenibles con capacidad para la degradación de contaminantes y la mejora del entorno urbano.



7.-RECOMENDACIONES

- Las nanopartículas de TiO_2 dopadas con Ag como adición en mezclas de pasta cemento-agua serán usadas como recubrimientos, con lo que esta investigación se puede extender a utilizarlas en diversas pastas de cementante-agua o cementante-agua-árido, como podrá ser mortero de albañilería, estuco o algún otro recubrimiento sólido.
- Para poder obtener resultados visibles lo mejor es aumentar el área de la superficie con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ que estará recibiendo la excitación de la luz UV y luz visible, para lo cual mezclas con un contenido mayor de aire puedan ser beneficiosas al tener una mayor porosidad superficial, también se puede optar por acabados con texturas que aumenten el área superficial.
- Se puede cambiar la metodología de las placas de cemento-agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$, usando una placa circular que se ponga en el fondo del vaso de precipitado y encima de esta el agitador magnético para que de esta forma se tenga más área superficial y se pueda usar una menor cantidad de contaminante, teniendo una relación **volumen del espécimen/ volumen del contaminante** mayor.

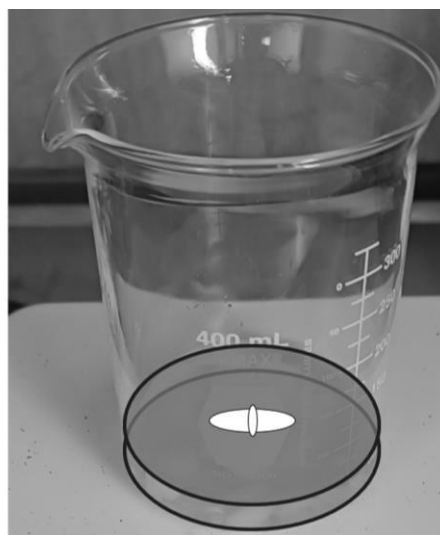
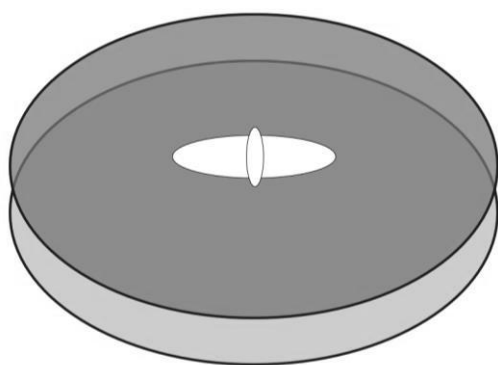
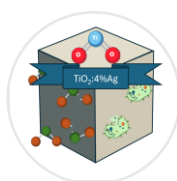


Ilustración 46: Cambio de metodología de las placas de pasta de cemento-agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ (Autoría propia)

- Se puede cambiar la metodología de los discos de pasta de cemento-agua con nanopartículas de $\text{TiO}_2:4\%\text{Ag}$ para inhibir microorganismos, poniendo discos, o elementos de otras formas adecuadas, adentro de un tubo de ensayo con

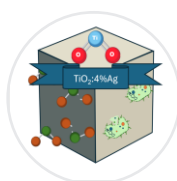


caldos Mueller-Hinton, que previamente se midió su absorbancia con UV-VIS, para exponerlos a los rayos UV o al sol directamente, por un tiempo determinado y medir de nuevo su absorbancia para determinar si hubo inhibición de microorganismos.

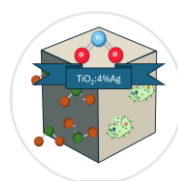
- La investigación no abarca el ámbito económico o de consecuencias del uso del TiO_2 con lo que se debe hacer una sub-investigación para saber esos puntos importantes en algún futuro cercano.

8.-DOCUMENTACIÓN CONSULTADA

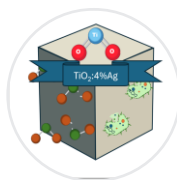
- [1] J.A. Borrego Pérez, E.R. Morales, F. Paraguay Delgado, C.A. Meza Avendaño, E.M. Alonso Guzman, N.R. Mathews, Ag nanoparticle dispersed TiO_2 thin films by single step sol gel process: Evaluation of the physical properties and photocatalytic degradation, *Vacuum* 215 (2023) 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112276>.
- [2] J. Jiang, X. Dong, H. Wang, F. Wang, Y. Li, Z. Lu, Enhanced mechanical and photocatalytic performance of cement mortar reinforced by nano- TiO_2 hydrosol-coated sand, *Cem. Concr. Compos.* 137 (2023) 104906. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104906>.
- [3] A.F. Prada Rojas, Evaluación de la efectividad del uso del fotocatalizador TiO_2 para la remoción de gases contaminantes tipo NO_x en el aire, Fundación Universidad de América, 2021.
- [4] J.A. Borrego Pérez, M. Courel, M. Pal, F.P. Delgado, N.R. Mathews, Effect of ytterbium doping concentration on structural, optical and photocatalytic properties of TiO_2 thin films, *Ceram. Int.* 43 (2017) 15777–15784. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.08.141>.



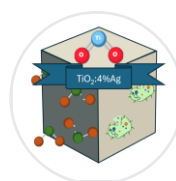
- [5] J.A. Borrego Pérez, M. Courel, R.C. Valderrama, I. Hernández, M. Pal, F.P. Delgado, N.R. Mathews, Structural, optical, and photoluminescence properties of erbium doped TiO₂ films, Vacuum 169 (2019) 108873. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.108873>.
- [6] Google, Google Earth, (2025). <https://earth.google.com/web/search/50°32%2753.3%22N+2°26%2726.2%22W/@50.54504204,-2.43862606,82.09487283a,11914.51578163d,35y,0h,0t,0r/data=CmlaNBluGSyVXGopRkIAIWQJxhxfhgPAKho1MMKwMzInNTMuMyJOIDLCsDI2JzI2LjliVxgCIAEiJgokCSbh6U9IJTNAESfh6U9IJTPAGT8nMctWw0>.
- [7] A.M. Neville, J.J. Brooks, Tecnología del concreto, Segunda ed, Pearson Education Limited, Harlow, 2013.
- [8] G. Deivy, Influencia del punto de rocío en mezclas de concreto, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2020.
- [9] S.H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W.C. Panarese, J. Tanesi, Diseño y Control de Mezclas de Concreto, decimo cua, Portland Cement Association (PCA), Skokie, 2004.
- [10] L.A. González Luna, Uso de fibras textiles recicladas y sílice como sustituto del cemento en la elaboración del concreto hidráulico, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, 2023.
- [11] R.J. Torrent, Comportamiento del Hormigón a Edad Temprana, Mater. Adv. Serv. (2020).
- [12] Mecánica Científica S.A., Mecánica científica s.a., (2016). <https://www.mecacisa.com/es/portfolio/aparato-vicat/>.
- [13] G.J. Barco Cordova, Luisvar Erlin; Del Carpio Alarcon, Elvia; Vargas-



- Luque, Arquimedes; Peña Renteria, William Franko; Donayre Loayza, Aditivos superplastificantes para el control del calor de hidratación de un concreto convencional en edificaciones urbanas, in: Congr. Científico La Fund. Salud, Cienc. y Tecnol. 2023, Salud, Ciencia y Tecnología, 2023: pp. 2–474.
- [14] N. Makul, Chapter 1 Introduction to the Principles of Cement and Concrete Composites, in: Princ. Cem. Concr. Compos., Springer Cham, 2021: pp. 1–27.
- [15] A.C.I.C. 211, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91), American Concrete Institute, 2022.
- [16] G.A. Moreno Reyes, Diseño por Durabilidad de Mezclas de Concreto Hidráulico variando los agregados pétreos. Evaluación de Resultados mediante Pruebas Destructivas y no Destructivas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, 2012.
- [17] Organismo Nacional de Normalización y Certificación Para La Construcción y Edificación, NMX-C-514-ONNCCE-2019 Industria de la Construcción-Resistividad eléctrica del concreto hidráulico-Especificaciones y Métodos de ensayo, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, CDMX, 2019.
- [18] Organismo Nacional de Normalización y Certificación Para La Construcción y Edificación, NMX-C-530-ONNCCE-2018-Industria de la construcción- Durabilidad- Norma General de Durabilidad de estructuras de concreto Reforzado- Criterios y Especificaciones.pdf, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, CDMX, 2018.

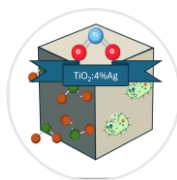


- [19] Organismo Nacional de Normalización y Certificación Para La Construcción y Edificación, NMX-C-275-ONNCCE-2020 Determinación de la velocidad de pulso ultrasónico a través del concreto-método de ensayo, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, CDMX, 2020.
- [20] Organismo Nacional de Normalización y Certificación Para La Construcción y Edificación, NMX-C-083-ONNCCE-2020 Industria de la construcción-concreto-determinación de la resistencia a la compresión de especímenes-método de ensayo, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, CDMX, 2020.
- [21] M.A. Contreras Flota, Concreto Ecológico elaborado a partir de desechos de vidrio como sustituto parcial de los agregados finos y gruesos., Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, 2023.
- [22] E.M. Silva Torres, Shannit Haiatt; Chávez García, Hugo Luis; Alonso Guzmán, Mezcla asfáltica con adición de material reciclado , PET y polvo de caucho, para el aumento de resistencia por fatiga, 2024.
- [23] H. Navarro Mendoza, Elena Guadalupe; Alonso Guzmán, Elia Mercedes; Becerra Santacruz, Desarrollo y evaluación de morteros de cal , integrando arena volcánica y PET reciclado para construcciones eficientes y sustentables, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2024.
- [24] Jayachandra, Y.R. Reddy, A.H. Nassar, M.Z. Kangda, H.J. Yashwanth, M.A. Khan, A.N.M. Asiri, S. Islam, S. Algburi, Symbiotic impact of carbon quantum dots on microstructural development and mechanical behaviour of cement mortars, Case Stud. Constr. Mater.

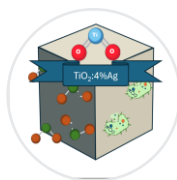


20 (2024) e03042. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03042>.

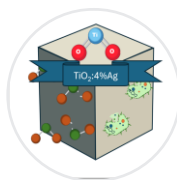
- [25] F. Amor, M. Baudys, Z. Racova, L. Scheinherrová, L. Ingrisova, P. Hajek, Contribution of TiO₂ and ZnO nanoparticles to the hydration of Portland cement and photocatalytic properties of High Performance Concrete, Case Stud. Constr. Mater. 16 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00965>.
- [26] M.F. Ashby, P.J. Ferreira, D.L. Schodek, Nanomaterials and Nanotechnologies: An Overview, in: Nanomater. Nanotechnologies Des., Primera ed, Elsevier, Ámsterdam, 2009: pp. 1–16. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-8149-0.00003-9>.
- [27] M.F. Ashby, P.J. Ferreira, D.L. Schodek, Nanomaterials: Classes and Fundamentals, in: Nanomater. Nanotechnologies Des., 2009: pp. 177–197. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-8149-0.00008-8>.
- [28] M. Márquez Durán, Eva; Hernández Moreno, David; Míguez Santiyán, María Prado; Soler Rodríguez, Francisco; Pérez López, Las Nanopartículas y sus aplicaciones biomédicas, Universidad de extremadura, Cáceres, 2021.
- [29] C. Chang, S. Rad, L. Gan, Z. Li, J. Dai, A. Shahab, Review of the sol-gel method in preparing nano TiO₂ for advanced oxidation process, Nanotechnol. Rev. 12 (2023). <https://doi.org/https://doi.org/10.1515/ntrev-2023-0150>.
- [30] B. Achimovicova, M., Vonderstein, C., & Friedrich, Mechanically activated rutile and ilmenite as the starting materials for process of titanium alloys production, in: Primera ed, IntechOpen, Londres, 2017: pp. 83–99. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.5772/intechopen.68747>.



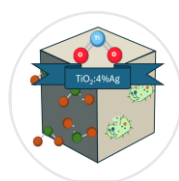
- [31] M. Sahadat Hossain, S. Ahmed, Easy and green synthesis of TiO₂ (Anatase and Rutile): Estimation of crystallite size using Scherrer equation, Williamson-Hall plot, Monshi-Scherrer Model, size-strain plot, Halder- Wagner Model, Results Mater. 20 (2023) 100492. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100492>.
- [32] J. Chang, icis, (2018). <https://www.icis.com/explore/resources/news/2018/07/19/10243097/tio2-players-in-major-asset-shuffle/>. (accessed October 16, 2025).
- [33] N. Godbert, ResearchGate, (2018). https://www.researchgate.net/figure/Crystal-structures-of-TiO-2-a-anatase-b-rutile-and-c-brookite-adapted-from_fig1_326011015.
- [34] M.A. Alam, R.K. Bishwas, S. Mostofa, S.A. Jahan, Impact on preferred orientation and crystal strain behavior of nanocrystal anatase-TiO₂ by X-ray diffraction technique, South African J. Chem. Eng. 49 (2024) 348–352. <https://doi.org/10.1016/J.SAJCE.2024.07.002>.
- [35] J.A. Benavides-Guerrero, P. Fourmont, L.F. Gerlein, A.C. Angel-Ospina, F. Machuca-Martinez, F. Vaussenat, C.A. Ross, S.G. Cloutier, Black anatase-TiO₂ electrodes for sun-activated photocatalytic degradation of organic water contaminants, Surfaces and Interfaces 58 (2025) 105849. <https://doi.org/10.1016/J.SURFIN.2025.105849>.
- [36] W. Adamowicz, M. Kobielusz, P. Mikrut, W. Macyk, Photocatalytic reduction of nitroaromatic compounds over tailored anatase TiO₂ crystals, Catal. Today 448 (2025) 115171. <https://doi.org/10.1016/J.CATTOD.2024.115171>.
- [37] M. Bermejo Fernández, Fotocatálisis y su capacidad



- descontaminante. Aplicación en Gran Vía, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2018.
- [38] R. Scaffaro, M.C. Mistretta, M. Balsamo, Innovative 3D-printed devices for water pollutant removal: Comprehensive review on printing parameters, composition, properties and performances of the latest 3D-systems, *Polym. Test.* 140 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108627>.
- [39] R. Dias, M.A. Daam, M. Diniz, R. Maurício, Drinking water treatment residuals, a low-cost and environmentally friendly adsorbent for the removal of hormones - A review, *J. Water Process Eng.* 56 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104322>.
- [40] H.A. Wani, V.R. Shaikh, D.H. More, K.J. Patil, Studies of monomer–dimer equilibria of methylene blue as a probe to investigate the solute–solvent and hydrophobic interactions in aqueous solutions of polyethylene glycols at 298 K, *Chem. Phys. Impact* 7 (2023) 100288. <https://doi.org/10.1016/J.CHPHI.2023.100288>.
- [41] O. Dos Santos Escobar, C. Ferraz De Azevedo, A. Swarowsky, M.A. Adebayo, M. Schadeck Netto, F. Machado Machado, Utilization of different parts of *Moringa oleifera* Lam. seeds as biosorbents to remove Acid Blue 9 synthetic dye, *J. Environ. Chem. Eng.* 9 (2021) 105553. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.105553>.
- [42] E. Phoebe, J. Asante, D. Gyamfi, A. Luther, K. Abia, S.Y. Essack, *Science of the Total Environment Africa*: A scoping review, 958 (2025).
- [43] D. Stępień-Pyśniak, T. Hauschild, R. Łopucki, U. Kosikowska, J. Wilczyński, M. Brzeski, P. Matusevičius, H. Christensen, Differences in tests of phenotypic colistin resistance in clinical *Escherichia coli*

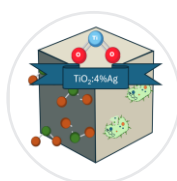


- isolates from poultry and their genetic diversity, *Vet. Microbiol.* 307 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2025.110581>.
- [44] M. Kato, K. Koyama, S. Koseki, Modeling and Validation of the Effects of Amino Group Concentrations in Food on the Growth of *Escherichia coli*, *J. Food Prot.* 88 (2025) 100512. <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2025.100512>.
- [45] M. Zandi, A. Ganjloo, M. Shahbazi, M.H. Shahavi, Development of balangu seed mucilage-gelatin films reinforced with TiO_2 nanoparticles and *Echinops Setifer* extract, *Ind. Crops Prod.* 235 (2025) 0–10. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121692>.
- [46] Z.H. Ali, A.H. Al-Fatlawi, Efficiency of silver nano particles in removing *Escherichia coli* ATCC 25922 from drinking water distribution pipes, *Results Eng.* 17 (2023) 100988. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100988>.
- [47] J. Nayeem, S.K. Dey, P. Dey, I.A. Himel, H. Khatoon, A comprehensive dataset on antimicrobial activity of indigenous *Oscillatoria* spp. against common bacteria causing diseases in fish and shellfish, *Data Br.* 50 (2023) 109563. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109563>.
- [48] M.A. Salam, M.Y. Al-Amin, J.S. Pawar, N. Akhter, I.B. Lucy, Conventional methods and future trends in antimicrobial susceptibility testing, *Saudi J. Biol. Sci.* 30 (2023) 103582. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2023.103582>.
- [49] Y. Zhang, F. Fan, X. Wang, J. Zhu, S. Dong, Establishment and application of a rapid new detection method for antimicrobial susceptibility testing of *Klebsiella pneumoniae* based on MALDI-TOF MS, *Microbiol. Spectr.* 13 (2025).

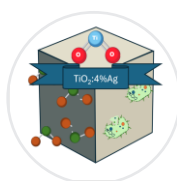


<https://doi.org/10.1128/spectrum.01346-24>.

- [50] A. Qasem, GC-MS Analysis, Antimicrobial Activity, and Genotoxicity of *Pimpinella anisum* Essential oil: In Vitro, ADMET and Molecular Docking Investigations, *Phyton-International J. Exp. Bot.* 94 (2025) 809–824. <https://doi.org/10.32604/phyton.2025.062683>.
- [51] M.C. Ogwuegbu, O.C. Olatunde, T.M. Pfukwa, D.M.N. Mthiyane, O.A. Fawole, D.C. Onwudiwe, Biofabrication of Co_3O_4 and Ag-doped Co_3O_4 nanoparticles using aqueous extracts of *Celtis occidentalis* leaves and their antimicrobial activity, *Heliyon* 11 (2025) e42966. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42966>.
- [52] H. Dhif, J. ben Salah-Abbès, A. Al-Amiery, K. Chaieb, M. Calleja-Gómez, H. Berrada, S. Abbès, Comparative antimicrobial activity of ethanol and aqueous extracts of *Ziziphus lotus* against bacteria and fungi, *Food Biosci.* 71 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.107149>.
- [53] C. Pawar, M. Patil, Nickel-doped zinc tartrate (Ni@ZnT) nanocrystals: Synthesis, optical properties, and antimicrobial activity, *Chem. Inorg. Mater.* 4 (2024) 100073. <https://doi.org/10.1016/j.cinorg.2024.100073>.
- [54] Organismo Nacional de Normalización y Certificación Para La Construcción y Edificación, NMX-C-414-ONNCCE-2017 Industria de la Construcción-Cementantes Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Ensayo, CDMX, 2017.
- [55] O.N. de N. y C.P.L.C. y Edificación, NMX-C-122-ONNCCE-2018 Agua para concreto, Organismo Nacional de Normalización y Certificación Para La Construcción y Edificación, CDMX, 2018.



- [56] Organismo Nacional de Normalización y Certificación Para La Construcción y Edificación, NMX-C-061-ONNCCE-2015 Industria de la construcción-cementos hidraulicos-determinacion de la resistencia a la compresion de cementantes hidraulicos, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, CDMX, 2015.
- [57] American Society for Testing and Materials, ASTM-C-109-16 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, 2016.
- [58] Universidad de Guanajuato, Protocolo para la preparación de la escala de McFarland, Guanajuato, 2022. https://www.ugto.mx/investigacionyposgrado/veranos/images/otros documentos_2022/17-PROTOCOLO-4_-JUANA_ELIZABETH_REYES-MARTINEZ.pdf.
- [59] L. del I. de I. e I. en E. Renovables(IIIER), Ciencia de frontera CONAHCYT CF-2023-G-985. Concretos y morteros auto degradantes de biota y compuestos contaminantes presentes en la atmósfera, para su aplicación en vivienda digna de interés social, en ciudades medias mexicanas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, n.d.
- [60] SEMARNAT, NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, CDMX, 2022. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/convencion-sobre-los-humedales-de-importancia->.



Deivy David Gómez Rodríguez

PASTAS CEMENTO-AGUA CON NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITANIO (TiO₂) DOPADAS CON PLATA (Ag) PAR...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:515572584

Fecha de entrega

20 oct 2025, 11:02 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

20 oct 2025, 11:06 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

PASTAS CEMENTO-AGUA CON NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITANIO (TiO₂) DOPADAS CONpdf

Tamaño del archivo

3.4 MB

98 páginas

23.602 palabras

131.601 caracteres

12% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 11%  Fuentes de Internet
- 6%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**
1214 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental	
Título del trabajo	Pastas cemento-agua con nanopartículas de dióxido de titanio (TiO ₂) dopadas con plata (Ag) para la degradación de contaminantes y la inhibición de microorganismos	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Deivy David Gómez Rodríguez	1208263c@umich.mx
Director	Dr. Hugo Luis Chávez García	luis.chavez@umich.mx
Codirector	Dr. Jorge Alberto Borrego Pérez	jorge.borrego@umich.mx
Coordinador del programa	Dr. Salomón Ramiro Vásquez García	mae.cs.ingenieria.ambiental@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	Si	Encontrar redundancias en el texto.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Deivy David Gómez Rodríguez
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán, México 16/10/2025