



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Evaluación del efecto de nanopartículas de dióxido de titanio y grafeno en las propiedades fotocatalíticas y autolimpiantes de morteros de cemento

Trabajo de Titulación, Modalidad Trabajo Experimental previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato

Autor: César Steven Guerra Cunalata

Tutor: Ing. M.Sc. W. Santiago Medina

AMBATO – ECUADOR

2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del Trabajo de Titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, con el tema: “**Evaluación del efecto de nanopartículas de dióxido de titanio y grafeno en las propiedades fotocatalíticas y autolimpiantes de morteros de cemento**”, elaborado por el estudiante César Steven Guerra Cunalata, portador de la cédula de ciudadanía número 1804825485, estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo de titulación, bajo la modalidad trabajo experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

Ambato, julio 2025



Ing. M.Sc. W. Santiago Medina

C.C.

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **César Steven Guerra Cunalata**, con C.C. 1804825485, declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el desarrollo del presente Trabajo de Titulación, Modalidad Trabajo Experimental con el tema: “**Evaluación del efecto de nanopartículas de dióxido de titanio y grafeno en las propiedades fotocatalíticas y autolimpiantes de morteros de cemento**”, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del trabajo experimental, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo. En tal virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, julio 2025



.....
César Steven Guerra Cunalata

C.C. 1804825485

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este trabajo experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y proceso de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi trabajo experimental, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, julio 2025



César Steven Guerra Cunalata

C.C. 1804825485

AUTOR

TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del trabajo experimental, realizado por el estudiante **César Steven Guerra Cunalata**, de la Carrera de Ingeniería Civil bajo el tema: "**Evaluación del efecto de nanopartículas de dióxido de titanio y grafeno en las propiedades fotocatalíticas y autolimpiantes de morteros de cemento**", Modalidad Trabajo Experimental.

Ambato, julio 2025

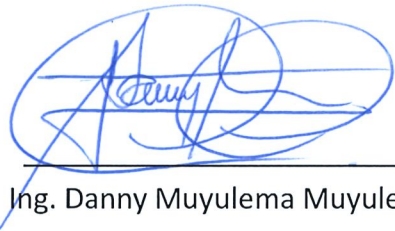
Para constancia firman:



Ing. Galo Núñez Aldas

MIEMBRO TRIBUNAL DE GRADO

C.C.: 1802229227



Ing. Danny Muyulema Muyulema Mg

MIEMBRO TRIBUNAL DE GRADO

C.C.: 1804015392

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por haberme acompañado en este camino lleno de desafíos, por no abandonarme nunca, por ser mi fuerza y guía constante, su compañía ha sido mi mayor motivación para no rendirme en todo este proceso. También quiero hacer énfasis en que este logro no es solo mío sino también de mi hermano Jhonathan Navarrete y mi mamá Susana Cunalata, quienes con su esfuerzo, sacrificio y amor incondicional han sido el pilar fundamental en toda esta etapa de mi vida; sin ellos, este logro no habría sido posible. Finalmente, dedico con todo mi corazón este trabajo a mi papá César Guerra, que desde el cielo me acompaña y que hoy culmino esta etapa y comienzo nuevos desafíos en mi vida, llevando conmigo su recuerdo siempre presente.

Cesar Steven Guerra Cunalata

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad Técnica de Ambato, a sus docentes y a la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica por brindarme la oportunidad de crecer académica y profesionalmente. Gracias por cada enseñanza, cada orientación y por su compromiso con nuestra formación. Este agradecimiento es también una forma de honrar a quienes me han sostenido con fe, cariño y ejemplo.

César Steven Guerra Cunalata

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PORTADA	i
APROBACIÓN DEL TUTOR	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
ACRÓNIMOS Y SIGLAS	xiv
RESUMEN EJECUTIVO.....	xv
ABSTRACT	xvi
CAPITULO I- MARCO TEÓRICO	1
A. Antecedentes Investigativos.....	1
1. Antecedentes	1
2. Justificación.....	4
a. Agregados o Áridos para morteros de Cemento	6
b. Agregados Finos	6
c. Nanomateriales	7
d. Dióxido de Titanio	7
e. Grafeno.....	8
f. Cemento	8

g. Cemento Portland	8
h. Mortero	9
i. Celda Electroquímica.....	13
j. Fotocatálisis	13
k. Propiedades fotocatalíticas de morteros de cemento	13
B. Objetivos	14
1. Objetivo General:	14
2. Objetivos Específicos:	14
CAPITULO II -METODOLOGÍA.....	15
A. Materiales y Equipos	15
1) Fase I	15
2) Fase II:	17
3) Fase III:.....	19
1. Métodos	19
1) Dosificación de materiales y preparación del mortero.....	19
2) Caracterización de propiedades fotocatalíticas del mortero	24
a) Ensayo a compresión de mortero.....	24
b) Espectrofotometría UV-Vis de las nanopartículas	25
c) Degradación de colorante (Azul de metileno).....	27
d) Medición de absorción espectral en morteros	28
3) Generación de corriente eléctrica	29
4) Determinación de capacidad Autolimpiante por el ensayo de rodamina B... 30	
a) Fotodegradación bajo luz simulada de Rodamina B.....	31
CAPITULO III-RESULTADOS Y DISCUSION	33
A. Análisis y discusión de resultados	33

1) Fase1	33
2) Fase 2	38
3) Fase 3	49
B. Verificación de Hipótesis.....	51
CAPITULO IV-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	52
A. Conclusiones	52
MATERIAL DE REFERENCIA	54
A. Referencias Bibliográficas	54
B. Anexos	60

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1 PROPORCIONES BASE PARA MORTEROS A TENER EN CUENTA	11
FIG. 2 MATERIALES HERRAMIENTA MENOR	15
FIG. 3 MATERIALES BALANZA ANALÍTICA	16
FIG. 4 MATERIALES CEMENTO PORTLAND	16
FIG. 5 MATERIALES NANOMATERIALES	17
FIG. 6 MATERIALES MOLDES ESTANDARIZADOS	17
FIG. 7 MATERIALES PRENSA HIDRÁULICA	17
FIG. 8 MATERIALES ESPECTROFOTÓMETRO	18
FIG. 9 MATERIALES SIMULADOR DE LUZ UV	18
FIG. 10 MATERIALES IMAGEJ SOFTWARE DE USO LIBRE	18
FIG. 11 MATERIALES KIT DE ANÁLISIS QUÍMICO	19
FIG. 12 CLASIFICACIÓN DE MORTEROS PARA MAMPOSTERÍA	20
FIG. 13 PORCENTAJE DE FLUIDEZ DEL MORTERO SEGÚN SUS TIPOS DE USO.	21
FIG. 14 VALORES RELACIÓN AGUA CEMENTO Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARA MORTEROS. .	21
FIG. 15 VALORES RELACIÓN AGUA CEMENTO Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARA MORTEROS. ..	22
FIG. 16 MÓDULOS DE FINURA DE AGREGADO FINO	22
FIG. 17 CONCENTRACIONES PARA ESPECTROFOTOMETRÍA	26
FIG. 18 LONGITUDES DE ONDA Y RANGO ESPECTRAL	29
FIG. 19 GRANULOMETRÍA	34
FIG. 20 RESULTADO DE ENSAYO A COMPRESIÓN	39
FIG. 21 ABSORBANCIA VS LONG DE ONDA 0.2 MG/ML	40
FIG. 22 ABSORBANCIA VS LONG DE ONDA 0.4 MG/ML	41
FIG. 23 ABSORBANCIA VS LONG DE ONDA 0.8 MG/ML	42
FIG. 24 CURVA DE CALIBRACIÓN	43
FIG. 25 DEGRADACIÓN DE COLORANTES	45
FIG. 26 ABSORCIÓN ESPECTRAL DE LUZ EN MORTEROS	46
FIG. 27 FOTODEGRADACIÓN DE MORTEROS A 4 HORAS	49
FIG. 28 FOTODEGRADACIÓN DE MORTEROS A 26 HORAS	50

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1	PROPORCIONES ESPECÍFICAS PARA ESPECTROFOTOMETRÍA	25
TABLA 2	DISOLUCIONES PARA ENSAYAR	26
TABLA 3	DOSIFICACIÓN PARA ENSAYO AZUL DE METILENO.....	27
TABLA 4	DOSIFICACIÓN PARA CUBOS DE 5X5X5 CM	31
TABLA 5	DENSIDAD REAL DE AGREGADO FINO	35
TABLA 6	DENSIDAD DEL CEMENTO.....	35
TABLA 7	DOSIFICACIÓN PARA 1M ³	36
TABLA 8	DOSIFICACIÓN PARA 125 CM ³	36
TABLA 9	DOSIFICACIÓN DE MUESTRAS	37
TABLA 10	ENSAYO A COMPRESIÓN.....	38

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 GRANULOMETRÍA	60
ANEXO 2 DENSIDAD DEL CEMENTO	61
ANEXO 3 DENSIDAD DEL AGREGADO FINO	62
ANEXO 4 DOSIFICACIÓN DEL MORTERO.....	63
ANEXO 5 ESPECTROFOTOMETRÍA	66
ANEXO 6 DEGRADACIÓN DE COLORANTES	71
ANEXO 7 CURVA DE CALIBRACIÓN	83
ANEXO 8 ABSORCIÓN ESPECTRAL	
ANEXO 9 FOTO DEGRADACIÓN BAJO LUZ SIMULADA Y MEDICIÓN DE CORRIENTE	84

ACRÓNIMOS Y SIGLAS

Acrónimo/Sigla	Significado
TiO ₂	Dióxido de titanio
GO	Óxido de grafeno (Graphene Oxide)
rGO	Óxido de grafeno reducido (Reduced Graphene Oxide)
UV	Ultravioleta
UV-Vis	Ultravioleta – Visible
PCE	Eficiencia de Conversión de Potencia (Power Conversion Efficiency)
DSSC	Célula Solar Sensibilizada por Colorante (Dye-Sensitized Solar Cell)
NO _x	Óxidos de nitrógeno
COV _s	Compuestos Orgánicos Volátiles
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials)
NTE INEN	Norma Técnica Ecuatoriana del Instituto Ecuatoriano de Normalización
EPN	Escuela Politécnica Nacional
GU	Uso General (General Use, tipo de cemento)
MS	Resistencia Moderada a Sulfatos
HS	Alta Resistencia a Sulfatos
HE	Alta Resistencia Inicial (High Early Strength)
MH	Moderado Calor de Hidratación
LH	Bajo Calor de Hidratación
R	Con Inclusión de Aire (Air-Entraining Option)
HPLC	Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia (High-Performance Liquid Chromatography)
EPP	Equipo de Protección Personal
IoT	Internet de las Cosas (Internet of Things)
C.C.	Cédula de Ciudadanía
MPa	Megapascal
nm	Nanómetro
g/cm ³	Gramos por centímetro cúbico
mg/mL	Miligramos por mililitro
m ² /g	Metros cuadrados por gramo
cm ² /V·s	Centímetro cuadrado por voltio-segundo
AM1.5	Espectro solar estándar de prueba (Air Mass 1.5)

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación se centró en evaluar el efecto de nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) y grafeno en las propiedades fotocatalíticas y autolimpiantes de morteros de cemento. Esta propuesta surge ante la necesidad de introducir soluciones sostenibles e innovadoras en la industria de la construcción en Ecuador, aprovechando la radiación solar como fuente de energía limpia.

El estudio incluyó la preparación de mezclas de mortero con diferentes concentraciones de TiO_2 (0.5%, 2%, 5%) y grafeno (0.05%, 0.5%, 1.0%), aplicadas a muestras cúbicas de 5x5x5 cm. Se llevaron a cabo ensayos de resistencia a la compresión, degradación de colorantes orgánicos (azul de metileno y rodamina B) y análisis espectrofotométrico bajo luz UV simulada, con el objetivo de caracterizar la actividad fotocatalítica y autolimpiante de los materiales desarrollados.

Los resultados demostraron que, aunque las mezclas dopadas presentaron una ligera disminución en la resistencia mecánica respecto a las muestras convencionales, evidenciaron una mejora sustancial en la degradación de contaminantes y en la absorción espectral. Además, se diseñó un sistema experimental que permitió validar preliminarmente la posibilidad de generar corriente eléctrica a partir de la radiación solar, utilizando las propiedades semiconductoras de los nanomateriales.

Este proyecto representa una investigación semilla que abre camino a futuras exploraciones sobre materiales multifuncionales en la construcción sostenible. A pesar de los resultados obtenidos, su desarrollo en Ecuador fue desafiante por la limitación de recursos, por lo que se requieren ensayos más avanzados para validar su aplicabilidad real.

PALABRAS CLAVE: MORTERO DE CEMENTO, DIÓXIDO DE TITANIO, GRAFENO, FOTOCATÁLISIS, AUTOLIMPIANTE

ABSTRACT

This research focused on evaluating the effect of titanium dioxide (TiO₂) and graphene nanoparticles on the photocatalytic and self-cleaning properties of cement mortars. The study addresses the need to introduce sustainable and innovative solutions in the Ecuadorian construction industry by harnessing solar radiation as a source of clean energy.

The experimental process involved the preparation of mortar mixtures with varying concentrations of TiO₂ (0.5%, 2%, 5%) and graphene (0.05%, 0.5%, 1.0%), applied to standardized 5x5x5 cm cubic specimens. Several tests were conducted, including compressive strength evaluation, degradation of organic dyes (methylene blue and rhodamine B), and UV-Vis spectrophotometric analysis under simulated ultraviolet light, with the aim of characterizing the photocatalytic and self-cleaning performance of the developed materials.

Results indicated that although the doped mixtures showed a slight decrease in mechanical strength compared to conventional samples, they significantly improved contaminant degradation and light absorption. Furthermore, an experimental setup was developed to preliminarily validate the potential of generating electric current from solar radiation, leveraging the semiconducting properties of the nanomaterials.

This project represents a seed research initiative that paves the way for future exploration of multifunctional materials in sustainable construction. Despite the results obtained, its development in Ecuador was challenging due to limited resources, highlighting the need for more advanced testing to validate its real-world applicability

KEYWORDS: CEMENT MORTAR, TITANIUM DIOXIDE, GRAPHENE, PHOTOCATALYSIS, SELF-CLEANING

CAPITULO I- MARCO TEÓRICO

A. Antecedentes Investigativos

1. Antecedentes

Durante los últimos años, la industria de la construcción específicamente la ingeniería civil ha comenzado a incorporar tecnologías emergentes orientadas hacia la sostenibilidad, se ha introducido en temas como la eficiencia energética y la mejora del desempeño de los materiales tradicionales. Una de estas tecnologías involucra el uso de nanomateriales, entre los cuales destacan el dióxido de titanio (TiO_2) y el grafeno, gracias a sus propiedades excepcionales que mejoran las características físicas como las funcionales de los morteros de cemento.

Antecedentes del uso de dióxido de titanio en cementos y morteros

El dióxido de titanio ha sido ampliamente estudiado por su capacidad fotocatalítica. Esta propiedad permite que, al ser activado por la radiación ultravioleta, el material desencadene reacciones redox capaces de degradar compuestos orgánicos y contaminantes atmosféricos como los óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COVs). El primer uso a gran escala de esta tecnología en la construcción se registró en Italia, en los años 90, con la producción del cemento "TX Active", desarrollado por Italcementi Group, el cual reducía contaminantes del aire en entornos urbanos [1].

Estudios posteriores confirmaron su eficacia. Chen et al. [2] analizaron diversas proporciones de TiO_2 en morteros, concluyendo que la adición de un 2% en peso mejora significativamente la degradación de NO_2 , sin afectar negativamente la resistencia mecánica. Complementariamente, investigaciones de Pacheco-Torgal et al. [3] reportaron que el uso de TiO_2 puede contribuir activamente en la reducción de gases contaminantes y en el mantenimiento estético de fachadas, debido a su efecto autolimpiante, manteniéndolas libres de manchas orgánicas durante más tiempo.

Otros trabajos, como el de Ballari y Brouwers[4] , evaluaron el efecto de la radiación UV en la eficiencia fotocatalítica, demostrando que los recubrimientos con TiO_2 reducen en más del 60% los niveles de NO_x en condiciones urbanas simuladas. A nivel de durabilidad, estudios como el de Guo et al. [5] indicaron que el TiO_2 puede mejorar la resistencia a la carbonatación y reducir la absorción capilar, lo que influye directamente en la vida útil del mortero.

Además, la inclusión de TiO_2 como semiconductor en el mortero permite aprovechar la radiación solar para generar corriente eléctrica cuando la matriz cementicia actúa como fotoelectrodo en un sistema fotoelectroquímico, gracias a la excitación de electrones y huecos bajo luz solar inspirado en el experimento pionero de Fujishima y Honda [6], que demostró la fotólisis de agua en un ánodo de TiO_2 sin necesidad de aplicación de potencial externo [6], se han diseñado morteros con electrodos incorporados capaces de producir corrientes del orden de microamperios por centímetro cuadrado simplemente con la incidencia de luz solar. Investigaciones más recientes han mostrado que al sensibilizar el TiO_2 con colorantes o doparlo para reducir su banda prohibida, se extiende la absorción al rango visible y se alcanzan eficiencias de conversión fotoeléctrica de hasta el 0,5 % bajo luz solar directa, suficiente para alimentar sensores de bajo consumo o pequeños acumuladores integrados en la propia estructura [7].

Aplicaciones y efectos del grafeno en morteros

El grafeno, una estructura bidimensional de átomos de carbono, ha generado gran interés en los últimos años por sus propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas excepcionales.[8] Si bien su aplicación en la construcción aún es emergente, investigaciones recientes han evidenciado su potencial para reforzar materiales de cemento.[8] En particular, el grafeno y sus derivados, como el óxido de grafeno (GO), mejoran la compacidad de la matriz del cemento, reducen la porosidad y refuerzan la adhesión interfacial entre las fases del compuesto.[8]

Muthukrishnan et al. [8] demostraron que la adición de grafeno en proporciones entre 0.05% y 0.5% mejora la resistencia a la compresión hasta en un 30% y también incrementa la resistencia a la fisuración temprana. Además, debido a su alta conductividad eléctrica, el

grafeno puede facilitar la transferencia de electrones en sistemas fotocatalíticos cuando se combina con TiO_2 , mejorando su eficiencia. Este efecto sinérgico ha sido confirmado en estudios de Zhao et al. [9], donde se observó una mayor generación de radicales libres cuando ambos materiales fueron incorporados simultáneamente.

Asimismo, investigaciones como las de Dimov et al. [10] han explorado el efecto del grafeno en el curado interno de los morteros, mostrando una reducción significativa de la retracción plástica y un mejor control del calor de hidratación. Estos aspectos son fundamentales en climas tropicales y de alta humedad como el ecuatoriano.

Contexto latinoamericano y ecuatoriano

En América Latina, los avances en nanomateriales aplicados a la construcción han sido constantes, aunque con menor intensidad que en otras regiones. Por ejemplo, Martínez et al. [11] evaluaron morteros modificados con TiO_2 y comprobaron su eficacia para disminuir gases contaminantes en entornos urbanos. En México, Ramírez et al. [12] analizaron la influencia del TiO_2 en el envejecimiento de fachadas, validando su durabilidad y capacidad autolimpiante.

En Ecuador, aunque los estudios sobre nanomateriales son aún escasos, existe un creciente interés académico y técnico. Investigaciones como las de Vizuite y Paredes [13] en la Escuela Politécnica Nacional evaluaron la influencia de nanopartículas de sílice en morteros, observando mejoras significativas en la resistencia mecánica. Este estudio sienta las bases para explorar el uso de otros nanomateriales en sistemas cementicios. Asimismo, en la Universidad de Cuenca se han desarrollado proyectos experimentales sobre aditivos minerales en morteros para la mejora de la durabilidad y eficiencia térmica[14].

La presente investigación se propone como innovadora en Ecuador en cuanto al uso combinado de TiO_2 y grafeno en morteros, con el objetivo de generar un material con propiedades fotocatalíticas y autolimpiantes adaptadas a las condiciones climáticas locales. El diseño experimental contempla tres niveles de concentración para TiO_2 (0.5%, 2%, 5%) y grafeno (0.05%, 0.5%, 1%), siguiendo un enfoque completo para estudiar las

interacciones entre ambas variables. Este tipo de diseño permite analizar estadísticamente el comportamiento del material y optimizar las dosificaciones.

2. Justificación

En un mundo donde la demanda energética sigue en constante crecimiento, la necesidad de desarrollar soluciones sostenibles se ha convertido en un desafío prioritario para la sociedad. Según la Agencia Internacional de Energía (AIE), se estima que para el año 2050, al menos el 70% de la energía generada a nivel mundial deberá provenir de fuentes renovables, con el fin de mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad energética global. A pesar de estos objetivos, la adopción de tecnologías avanzadas para la captura y conversión de energía solar sigue enfrentando múltiples barreras técnicas y económicas, especialmente en sectores como la construcción.

Ecuador, por su ubicación geográfica privilegiada, cuenta con altos niveles de radiación solar a lo largo del año, lo que representa una oportunidad significativa para el desarrollo de soluciones innovadoras en el ámbito de la energía renovable. Sin embargo, a pesar de este potencial, el país aún muestra una baja integración de tecnologías solares en infraestructuras urbanas y edificaciones. Actualmente, la industria de la construcción sigue dependiendo en gran medida de materiales tradicionales que no incorporan funcionalidades avanzadas para el aprovechamiento energético. Esta situación representa una limitación para la optimización del consumo de energía en edificaciones y urbanismo sostenible. En este contexto, la introducción de materiales con capacidad fotovoltaica dentro del sector constructivo podría representar un avance tecnológico significativo. En particular, la adición de nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) y grafeno en morteros de construcción ha sido objeto de diversas investigaciones a nivel internacional debido a sus propiedades fotocatalíticas y conductoras, que permiten la absorción y conversión de la energía solar en energía aprovechable. Sin embargo, en Ecuador no existen estudios exhaustivos sobre el potencial de estos nanomateriales en la construcción, lo que restringe su implementación práctica y limita el conocimiento sobre su aplicabilidad en condiciones locales. Por lo tanto, esta investigación busca llenar una brecha en la literatura científica al evaluar el desempeño de un mortero fotovoltaico con nanopartículas de TiO_2 y grafeno,

proporcionando información relevante sobre su viabilidad técnica y eficiencia en la captación de energía solar. Este enfoque contribuirá a la generación de nuevos conocimientos en el área de materiales avanzados, fortaleciendo el desarrollo de la ciencia y la tecnología en el país. Desde una perspectiva ambiental, el desarrollo de un mortero con propiedades fotovoltaicas permitiría reducir la dependencia de fuentes fósiles y disminuir la huella de carbono del sector de la construcción, que actualmente es uno de los mayores emisores de CO₂ a nivel global. La incorporación de esta tecnología en infraestructuras urbanas podría fomentar el diseño de ciudades más sostenibles, integrando sistemas pasivos de generación de energía que contribuyan a una mayor eficiencia energética en edificaciones. Desde un enfoque práctico, este proyecto ofrece una solución innovadora para la integración de energía renovable en infraestructuras urbanas, con aplicaciones potenciales en fachadas, pavimentos, aceras y elementos constructivos. El desarrollo de un mortero con capacidades fotovoltaicas permitiría transformar elementos pasivos de construcción en superficies activas generadoras de energía, optimizando el uso del espacio urbano y promoviendo la autosuficiencia energética en edificios y espacios públicos. En el ámbito económico y social, la implementación de esta tecnología podría impulsar el crecimiento del sector de materiales de construcción avanzados en Ecuador, fomentando la innovación y el desarrollo tecnológico. Además, al reducir la dependencia de sistemas energéticos convencionales, se podrían generar beneficios económicos a largo plazo mediante la disminución de costos de electricidad en edificaciones que integren este tipo de soluciones.

Finalmente, esta investigación no solo tiene implicaciones científicas y tecnológicas, sino que también responde a una necesidad estratégica del país en la búsqueda de soluciones sostenibles para el desarrollo urbano. Contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular al ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) y al ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), alineándose con los compromisos internacionales en materia de cambio climático y transición energética. Por lo tanto, este estudio representa un avance significativo en la intersección entre nanotecnología, energías renovables y materiales de construcción, sentando las bases para futuras investigaciones y aplicaciones industriales en el país.

Fundamentación Teórica

a. Agregados o Áridos para morteros de Cemento

El término agregado, o árido, se emplea para denominar a los materiales pétreos inertes (naturales o manufacturados) con tamaños de partícula inferiores a 4,75 mm utilizados en la elaboración de morteros de cemento, cuya función principal es mejorar la trabajabilidad y resistencia mecánica[15]. En morteros de cemento, los áridos finos pueden provenir de arenas naturales de río o ser manufacturados, debiendo cumplir los límites de impurezas orgánicas y limos según la especificación ASTM C33 para garantizar adherencia y durabilidad[16]. La caracterización granulométrica de estos áridos finos se realiza mediante tamizado —módulo de finura entre 2,3 y 3,1— conforme al método descrito en la NTE INEN 696.

b. Agregados Finos

Se denomina agregado fino a la fracción de árido que pasa por el tamiz de 9,5 mm (3/8") y es retenida en el tamiz #200 (75 μ m) [16].

Algunas de las características de una buena arena incluyen:

- Las mejores arenas son las extraídas de ríos, formadas por granos de cuarzo redondeados que mejoran la trabajabilidad y reducen puntos débiles en la matriz del mortero [17].
- Se recomienda un módulo de finura entre 2,3 y 3,1 para lograr un óptimo empaquetamiento y trabajabilidad [16].
- El porcentaje de material que pasa el tamiz #200 no debe exceder el 5 % [16].
- Impurezas: arcilla y partículas frágiles ≤ 3 % y materia orgánica y carbón $\leq 0,5$ % en masa para no comprometer la adherencia y la hidratación del cemento [17].
- Valores típicos de 2,60–2,70 g/cm³ [16].

c. Nanomateriales

Los nanomateriales fotovoltaicos basados en TiO_2 y grafeno han mostrado un gran potencial para mejorar la generación de energía solar. El TiO_2 , ampliamente utilizado como fotoánodo en células sensibilizadas por colorante (DSSC), permite aprovechamiento eficiente de la luz solar y ha logrado eficiencias de conversión superiores al 7 % gracias a su estabilidad química y adecuada banda prohibida [18]. Por su parte, el grafeno se emplea como electrodo transparente de alta conductividad (> 90 % de transparencia) y como capa colectora de electrones en heterouniones grafeno-silicio, alcanzando eficiencias de hasta el 15,6 % al optimizar el óxido interfacial y reducir la recombinación de cargas [18]. La integración de TiO_2 y grafeno en nanocompuestos para células de perovskita ha posibilitado procesos de fabricación a baja temperatura (< 150 °C) y conversiones de potencia también cercanas al 15,6 %, abriendo la vía a dispositivos flexibles y de bajo coste [18]. Además, el dopaje iónico del grafeno ha demostrado mejorar la inyección y transporte de portadores de carga, elevando la eficiencia global de celdas heterounión grafeno-silicio por encima del 9,6 %.[18]

d. Dióxido de Titanio

El TiO_2 es un semiconductor de banda prohibida ancha ($\sim 3,2$ eV en su fase anatasa) que actúa como fotoánodo en DSSC, proporcionando alta estabilidad y movilidad de electrones [19]. Estructuras unidimensionales de TiO_2 , como nanotubos de aproximadamente 500 nm de diámetro, han permitido alcanzar PCE de hasta el 7 % bajo iluminación estándar AM1.5 gracias a la mejora en la recolección de cargas[20][21] . El tratamiento con TiCl_4 de la superficie de los photoanodos TiO_2 incrementa la densidad de fotocorriente y reduce la recombinación, elevando la eficiencia de DSSC de un 6 % a casi un 8 % [22]. Investigaciones recientes en compuestos de TiO_2 dopados con Fe y S han mostrado que es posible doblar la eficiencia de fotoconversión —de un 3,4 % para TiO_2 puro a un 6,46 % para Fe/S- TiO_2 — mediante métodos de fotólisis y dopaje iónico [23]. Cuando se utilizan membranas de nanotubos autoorganizados en configuraciones de doble capa, la PCE puede subir hasta un 9,8 % gracias a la supresión de la recombinación y un transporte electrónico más eficiente [23]. Además, combinando TiO_2 mesoporoso con ITO nanotubular en

arquitecturas multidimensionales, se han conseguido eficiencias de hasta un 24 % bajo iluminación interior tenue, lo que abre camino a aplicaciones en sensores y dispositivos IoT de bajo consumo [20].

e. Grafeno

El grafeno, con su movilidad de carga superior a $200\,000\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ y transparencia óptica de más del 97 %, se ha consolidado como electrodo transparente en DSSC y células orgánicas de alta flexibilidad [24]. En heterouniones grafeno-silicio, la optimización del grosor de la capa nativa de óxido permite alcanzar PCE de hasta el 15,6 % tras dopado con TFSA y aplicación de recubrimientos antirreflectantes [25]. En celdas de perovskita flexibles, el grafeno funciona como ánodo y cátodo, logrando PCE de 6,1 % y 7,1 % respectivamente mediante procesos de deposición a baja temperatura ($< 150\text{ }^\circ\text{C}$)[26] . La dopación iónica de grafeno ha mejorado la eficiencia de heterouniones grafeno-silicio entre un 1 % y un 2 %, elevando la PCE prototípica de 8,6 % en 2012 a 9,6 % en 2013 [26]. Asimismo, la combinación de grafeno con TiO_2 en nanocompuestos para celdas de perovskita ha permitido fabricar dispositivos económicos y flexibles a temperaturas bajas, alcanzando PCE de hasta el 15,6 % [26].

f. Cemento

Al cemento se le clasifica como un material de construcción, de naturaleza aglomerante caracterizado por su capacidad de aglomerante, lo que facilita la unión de fragmentos de origen mineral para conformar una masa homogénea. Este compuesto garantiza estructuras con resistencia mecánica óptima y estabilidad prolongada en el tiempo[27].

g. Cemento Portland

Su fabricación se deriva de un proceso industrial basado en minerales calcáreos como la caliza, alúmina y sílice, los cuales se obtienen de depósitos naturales, junto con arcilla[27]. Para mejorar sus propiedades químicas, es habitual incorporar aditivos, siendo el óxido de hierro (FeO) el más empleado en estas mezclas[27]. Todo cemento Portland destinado a la elaboración de morteros debe cumplir con los requisitos establecidos en la norma ASTM

C-150[28], la norma NTE INEN 152 que lo clasifica en distintas tipologías según sus características técnicas. [29]

- **Tipo GU (General Use):** Para construcción en general cuando no se requieren propiedades especiales[29].
- **Tipo HE (High Early Strength):** Alta resistencia inicial, útil para desmolde y puesta en servicio temprana[29].
- **Tipo MS (Moderate Sulfate Resistance):** Resistencia moderada a sulfatos, para ambientes con niveles intermedios de ataque de sulfatos[29].
- **Tipo HS (High Sulfate Resistance):** Alta resistencia a sulfatos, indicado en suelos o aguas con altos contenidos de sulfatos[29].
- **Tipo MH (Moderate Heat of Hydration):** Moderado calor de hidratación, para reducir riesgo de fisuración en elementos masivos[29].
- **Tipo LH (Low Heat of Hydration):** Bajo calor de hidratación, ideal en presas y grandes volúmenes continuos[29].
- **Opción R (Air-Entraining):** Puede aplicarse a cualquiera de los tipos anteriores para mejorar la resistencia al ciclaje de congelamiento y descongelamiento[29].

h. Mortero

Es una mezcla de consistencia plástica obtenida al combinar un aglomerante, arena y agua, cuyo propósito es unir elementos de mampostería y servir de base para revestimientos, enlucidos y acabados. La clasificación de los morteros varía según el aglomerante empleado puede ser yeso, cal o cemento y existen además formulaciones mixtas, llamadas morteros bastardos, que combinan dos aglomerantes (por ejemplo, cal y cemento o yeso y cal). La mezcla entre aglomerante y agua puede variar en fluidez dependiendo de la cantidad relativa de líquido: una proporción equilibrada produce una consistencia trabajable, mientras que un exceso puede generar lechadas muy líquidas, y un déficit, mezclas secas y poco adherentes[27].

Tipos de morteros

De acuerdo con su uso específico, los morteros pueden ser agrupados en tipos como los destinados a:

Según para lo que van a ser usado:

- Mortero para Unir bloques (colocación)

Este tipo de mortero es utilizado para la pega de ladrillos o piedras, para la construcción de mampostería. Para la dosificación de este tipo de mortero para la pega de ladrillos o piedras, estará en función del material aglomerante que se use[27].

- Mortero para recubrimientos y terminaciones superficiales (acabado)

Este tipo de mortero es bien utilizado en el proceso de acabado de elementos arquitectónicos para dar apariencias estéticas, se usa también en trabajos de aplanado y enlucidos. Dentro de sus características para acabados este debe ser de gran resistencia, buena trabajabilidad, durabilidad a los agentes físicos como lluvia, viento, sol, etc[27].

Materiales de unión (aglomerante)

- Mortero de Cemento

Este tipo de mortero se elabora utilizando cemento como agente de unión y arena como componente granular, ajustando su dosificación conforme a las necesidades de resistencia y vida útil esperada. Este tipo de mortero proporciona una buena resistencia mecánica y una notable impermeabilidad, lo que lo hace adecuado para aplicaciones expuestas al agua o condiciones agresivas[27].

Fig. 1 Proporciones base para morteros a tener en cuenta

Morteros de cemento y arena			
Tipo de Mortero	Proporción en volumen		Resistencia Kg/cm ²
	Cemento	Arena	
Ricos	1	1	160
	1	2	
	1	3	
Ordinarios	1	4	130
	1	5	98
Pobres	1	6	75
	1	8	50

FUENTE 1 Ingeniería Rural. Morteros de cemento y arena

Según la Fuerza (Norma ASTM C270)

- Mortero tipo M

Mortero característico por tener una resistencia mínima de 17.2 MPa. Es bien utilizado en trabajos de albañilería exterior o en lugares donde se ejerza cargas importantes ya sea de gravedad o laterales como en muros de carga, muros de contención. [27]

- Mortero tipo S

Mortero característico por tener una resistencia media de 12.4 MPa con una alta capacidad de unión. El mortero de tipo S tiene una gran durabilidad, por lo que es muy eficiente en lugares donde la mampostería esté en contacto con el suelo, como en pavimentos o muros de contención profundos. La aplicación de este mortero es donde la carga sea de grado normal y moderada. [27]

- Mortero tipo N

Mortero característico por tener una resistencia de 5.2 MPa, siendo el mortero de uso común. Su uso es para muros de carga reforzados en exteriores e inferiores sobre los que actúan cargas normales. [27]

- Mortero tipo O

Mortero característico por tener una resistencia baja de 2,5 MPa, el empleo de este tipo de mortero se lo hace en interiores que no presenten cargas, el uso exterior es muy limitado para este mortero, sumado a esto se usa para devolver la integridad estructural de una pared. [27]

Según el propósito

- Resistente al fuego

Este tipo de mortero se lo prepara con la mezcla de cemento aluminoso con polvo fino de los ladrillos de fuego. Cuando se tenga una alerta de fuego en las estructuras en una zona en particular se usará este tipo de mortero como material incombustible. [27]

- Absorbente de sonido

Este tipo de mortero es característico por tener la capacidad de reducir el ruido y actúa como capa protectora del mismo; el cemento, la cal, el yeso o la escoria de la absorción acústica como materiales aglomerantes y la piedra pómez, las cenizas como agregado fino hacen posible la reducción del sonido. [27]

- Resistente a productos químicos

Este tipo de mortero es característico por soportar agentes químicos, pero la selección de mortero para soportar estos agentes químicos debe ser de acuerdo al producto o productos que van a actuar sobre dicho mortero. Los aditivos añadidos pueden no ser capaz de resistir todos los agentes químicos, por ejemplo, el mortero de tipo silicato tiene la capacidad de resistir daños nítricos, crómicos, sulfúricos o ácidos pero no es capaz de retener el daño por álcalis, por ello se debe tener claro los agentes químicos a ser soportados. [27]

i. Celda Electroquímica

Una celda electroquímica es un dispositivo capaz de convertir la energía química de una reacción redox en energía eléctrica o, inversamente, utilizar energía eléctrica para inducir una reacción química no espontánea. Este sistema está compuesto típicamente por dos electrodos (ánodo y cátodo) sumergidos en soluciones electrolíticas, donde ocurre la transferencia de electrones a través de un circuito externo y el transporte de iones a través del medio conductor iónico (puente salino o membrana). Dependiendo de su función, las celdas se clasifican como galvánicas (generan electricidad espontáneamente) o electrolíticas (requieren un suministro de energía externa para operar)[30].

j. Fotocatálisis

La fotocatálisis es un proceso químico en el que una sustancia llamada fotocatalizador acelera una reacción química al absorber luz (normalmente luz ultravioleta o visible) sin consumirse en la reacción[31].

Cuando el fotocatalizador, como el dióxido de titanio (TiO_2), recibe luz, sus electrones se excitan y saltan de la banda de valencia a la banda de conducción, dejando huecos. Estos electrones y huecos generan radicales libres altamente reactivos (como radicales hidroxilo o superóxidos) que pueden descomponer contaminantes orgánicos, bacterias o compuestos tóxicos presentes en el agua o el aire[32].

k. Propiedades fotocatalíticas de morteros de cemento

Las propiedades fotocatalíticas de morteros de cemento se refieren a la capacidad que tienen estos materiales para degradar contaminantes orgánicos presentes en el aire o el agua, gracias a la incorporación de fotocatalizadores como el dióxido de titanio (TiO_2)[33]. Al ser activado por la luz (generalmente UV), el TiO_2 produce radicales libres que pueden oxidar y descomponer sustancias como óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COVs) o bacterias[34].

Cuando se incorpora en morteros, estas propiedades no solo aportan características autolimpiantes y purificadoras del aire, sino que también pueden contribuir a la durabilidad

el material, siempre que se mantenga su exposición a la luz y a condiciones adecuadas de activación.[34]

B. Objetivos

1. Objetivo General:

Elaborar un mortero con adición de nanopartículas de dióxido de titanio y grafeno, para determinar el efecto en sus propiedades fotocatalíticas y autolimpiantes.

2. Objetivos Específicos:

1) Elaborar morteros de cemento con diferentes concentraciones de dióxido de titanio y grafeno, aplicando las normas ASTM C305, NTE INEN 2518:2010 vigentes.

2) Caracterizar las propiedades fotocatalíticas del mortero con la adición de nanopartículas de dióxido de titanio y grafeno, mediante espectrofotometría UV-Vis, ensayos de degradación de colorantes, medición de generación de corriente eléctrica y absorción espectral de luz, evaluando su rendimiento y factibilidad para su uso.

3) Determinar la capacidad autolimpiante del mortero mediante pruebas específicas de fotodegradación bajo luz simulada, evaluando la eficiencia en la eliminación de contaminantes orgánicos superficiales y el impacto de las condiciones de exposición.

CAPITULO II -METODOLOGÍA

En la primera fase, se realizó la preparación y selección de materiales, donde se definen los componentes base, como el cemento, arena, agua y los aditivos principales (nanopartículas de dióxido de titanio y grafeno). En esta etapa se incluye el diseño analítico para determinar las proporciones óptimas de mezcla y la preparación de probetas bajo condiciones estandarizadas. La segunda fase se enfoca en la realización de pruebas de espectrofotometría, degradación de colorantes, y fotodegradación superficial, con el objetivo de evaluar la eficiencia autolimpiante del mortero bajo condiciones simuladas. Se analizan los residuos resultantes y se estudia el efecto de variables como la exposición a luz artificial y su intensidad sobre el desempeño fotocatalítico del material. Finalmente, los datos obtenidos se procesan para identificar correlaciones entre las concentraciones de aditivos y las propiedades evaluadas, proporcionando un análisis integral del rendimiento del mortero y su factibilidad de uso. Este enfoque, que incluye un diseño experimental, permite validar las hipótesis planteadas y cumplir con los objetivos específicos del proyecto.

A. Materiales y Equipos

1) Fase I

Herramienta menor: Espátulas, bandejas de mezclado, cucharas metálicas y agitadores manuales.

Fig. 2 Materiales Herramienta menor



Equipo de protección personal (EPP): Guantes de nitrilo, gafas de seguridad, mascarillas para partículas finas, y mandil. Balanzas analíticas.

Fig. 3 Materiales Balanza Analítica



Materiales principales: Cemento Portland (base del mortero), Arena, Agua destilada o potable para mezcla.

Fig. 4 Materiales Cemento portland



Aditivos principales: Nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2), Nanopartículas de grafeno.

Fig. 5 Materiales Nanomateriales



Moldes y ensayos normalizados de 5x5x5 cm.

Fig. 6 Materiales Moldes estandarizados



Software estadístico (excel) y bibliografía.

2) Fase II:

Herramientas y Equipos: Horno de secado. Equipo de pruebas mecánicas.

Prensas hidráulicas para pruebas de compresión (ASTM C109).

Fig. 7 Materiales Prensa Hidráulica



Espectrofotómetro UV-Vis Fisher Scientific, AccuSkan GO.

Fig. 8 Materiales Espectrofotómetro



Cámara de degradación para simulación de luz solar CAMAG TLC Visualizer 3, etanol al 96%, vidrios conductores.

Fig. 9 Materiales Simulador de luz Uv



Materiales complementarios: Colorantes orgánicos para pruebas de degradación (azul de metileno). Software para procesamiento de imágenes ImageJ gratuito.

Fig. 10 Materiales ImageJ Software de uso libre



3) Fase III:

Software de análisis estadístico: Microsoft Excel para análisis de datos preliminares, softwares para análisis de tendencias y correlaciones, Kits de análisis químico básico para evaluar residuos.

Fig. 11 Materiales Kit de análisis químico



1. Métodos

1) Dosificación de materiales y preparación del mortero.

En esta fase se llevó a cabo un diseño metodológico de enfoque analítico, con el objetivo de elaborar morteros de cemento con distintas concentraciones de dióxido de titanio (TiO_2) y grafeno. Para garantizar la estandarización del procedimiento, se aplicaron las normas ASTM C305 y NTE INEN 2518:2010, tomando en cuenta que para la aplicación de este proyecto se debía adaptar varios procedimientos al contexto de los objetivos establecidos previamente. Las actividades desarrolladas se describen a continuación:

Paso 1: Selección de materiales

Se realizó la selección de los materiales necesarios para la elaboración de los morteros, considerando los siguientes criterios:

- **Cemento:** Se empleó cemento Portland tipo GU para construcción en general cuando no se requieren propiedades especiales.
- **Arena:** Se utilizó arena con granulometría ajustada, de la cantera Pungal de Puela correspondiente a una arena estándar para ensayos de mortero, con un módulo de finura

(MF) de 2.4 a 2.5, según las recomendaciones de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), lo cual asegura una buena cohesión y control del calor de hidratación.

• **Aditivos:**

- **Dióxido de titanio (TiO_2):** Se utilizó TiO_2 con una pureza $\geq 99\%$ y un tamaño de partícula inferior a 100 nm.
- **Grafeno:** Se empleó grafeno monocapa con un área superficial $\geq 750 \text{ m}^2/\text{g}$.

Paso 2: Clasificación de Morteros para Mampostería Simple

Se determino el mortero óptimo para nuestra investigación de acuerdo con la siguiente Fig.

12 Clasificación de morteros para mampostería

Fig. 12 Clasificación de morteros para mampostería

Tabla 14.1 Clasificación ASTM C-270 de morteros de pega para mampostería simple, según resistencia a la compresión a 28 días y según dosificación (partes por volumen) (14.4)

Tipo de Mortero	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a compresión (Kg/cm^2)	Resistencia a compresión (p.s.i.)	Cemento Portland	Cemento albañilería	Cal	Agregado fino suelto
M	17.2	175	2.500	1 1	1 -	0.25	Entre 2.25 y 3 veces la suma de cemento y cal utilizados
S	12.4	126	1.800	0.5 1	1 -	0.25 a 0.50	
N	5.2	53	750	- 1	1 -	0.5 a 1.25	
O	2.4	25	350	- 1	1 -	1.25 a 2.50	
K	0.5	5	75	1	-	2.50 a 4.00	

FUENTE 2 Tecnología del concreto y mortero, Diego Sánchez de Guzmán

Paso 3: Selección de la consistencia

Se define la consistencia adecuada del mortero mediante la Fig. 13 Porcentaje de fluidez del mortero según sus tipos de uso. garantizando una mezcla uniforme y trabajable.

Fig. 13 Porcentaje de fluidez del mortero según sus tipos de uso.

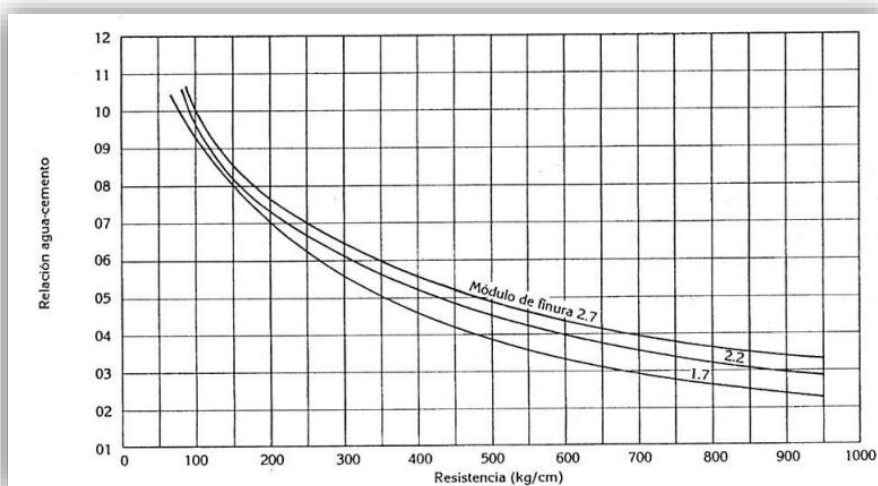
% FLUIDEZ (MESA DE FLUJO)	CONSIS- TENCIA	TIPO DE ESTRUCTURA	CONDICIONES DE COLOCACIÓN	SISTEMA DE COLOCACIÓN
80-100	Dura (seca)	Reparaciones, recubrimiento de túneles, galerías, pantallas de cimentación, pisos.	Secciones sujetas a vibración.	Proyección neumática, con vibradores de formaleta.
100-120	Media (plástica)	Pega de mampostería, baldosines, pañetes y revestimientos.	Sin vibración.	Manual con palas y palustres.
120-150	Fluida (húmeda)	Rellenos de mampostería estructural, morteros autonivelantes para pisos.	Sin vibración.	Manual, bombeo, inyección.

FUENTE 2 Tecnología del concreto y mortero, Diego Sánchez de Guzmán

Paso 4: Determinación de la relación agua/cemento

Se establece la relación óptima agua/cemento para cada mezcla, con el fin de obtener una trabajabilidad adecuada sin comprometer las propiedades mecánicas del mortero.

Fig. 14 Valores relación agua cemento y resistencia a la compresión para morteros.

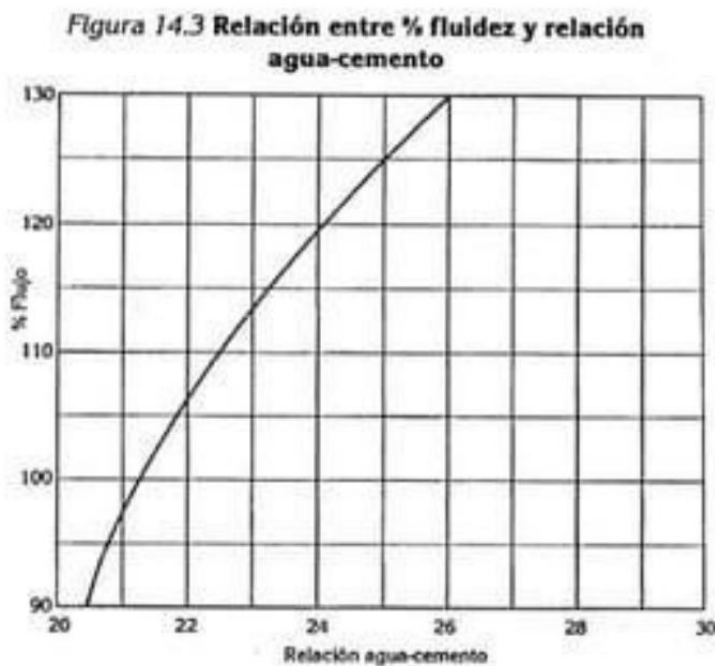


FUENTE 3 Tecnología del concreto y mortero, Diego Sánchez de Guzmán

Paso 5 Determinación de la relación agua cemento de acuerdo con la fluidez

Se determina el valor determinado K útil para nuestro calculo tomando en cuenta la fluidez que esperamos y necesitamos en nuestro mortero.

Fig. 15 Valores relación agua cemento y resistencia a la compresión para morteros.



FUENTE 2 Tecnología del concreto y mortero, Diego Sánchez de Guzmán

Paso 6 Determinación del término b

El termino b es el que relaciona la fluidez esperada con el módulo de finura que se determina de acuerdo con los ensayos de la arena para el mortero, utilizando la siguiente tabla.

Fig. 16 Módulos de finura de agregado Fino

Tabla 14.8 Valores de b para distintas consistencias y módulos de finura de la arena (14.2)

Consistencia	Módulo de Finura	Arena de granos redondos y lisos	Arena de granos angulares y rugosos
Seca (90 %)	1.7	0.3293	0.3215
	2.2	0.3110	0.3028
	2.7	0.2772	0.2930
	3.2	0.2394	0.2494
Plástica (110 %)	1.7	0.3242	0.3238
	2.2	0.3033	0.2947
	2.7	0.2734	0.2879
	3.2	0.2368	0.2477
Fluida (130 %)	1.7	0.3172	0.3216
	2.2	0.2927	0.3003
	2.7	0.2687	0.2949
	3.2	0.2340	0.2629

FUENTE 3 Tecnología del concreto y mortero, Diego Sánchez de Guzmán

Determinación de la proporción nominal

Se calcula de acuerdo con las siguientes ecuaciones la relación necesaria para el mortero.

Paso 7 al 10: Cálculo de proporciones

Se calcula las proporciones necesarias de cemento, agua y arena para cada mezcla. Además, se realizaron los siguientes ajustes:

- **Determinación de la proporción nominal**

Calcular de acuerdo con la siguiente ecuación 1 a relación necesaria para el mortero.

$$n = \left(\frac{\ln\left(\frac{A}{C}\right) - \ln(K)}{b} \right) \quad 1$$

- **Cálculo del contenido de cemento**

Calcular de acuerdo con la siguiente ecuación 2 el contenido de cemento.

$$C = \left(\frac{1000}{\frac{1}{dc} + \frac{n}{dra} + \frac{a}{c}} \right) \quad 2$$

- **Cálculo del contenido de agua**

Calcular de acuerdo con la siguiente ecuación 3 el contenido de agua.

$$A = \frac{a}{C} * C \quad 3$$

- **Cálculo del contenido de arena**

Calcular de acuerdo con la siguiente ecuación 4 el contenido de arena.

$$a = C * n \quad 4$$

Paso 11 Preparación de probetas

Las mezclas obtenidas fueron vertidas en moldes estandarizados de forma cúbica (50×50×50 mm) según lo establecido por la norma ASTM C511[35] para el curado de las probetas en cámaras de humedad controlada por un período mínimo de 28 días. y almacenamiento. El mezclado se realizó de manera manual garantizando la homogeneidad de las mezclas y la distribución uniforme de los aditivos.

2) Caracterización de propiedades fotocatalíticas del mortero

En esta fase se adopta un diseño metodológico de enfoque práctico-experimental, con el objetivo de caracterizar las propiedades fotocatalíticas del mortero dopado con nanopartículas de dióxido de titanio (TiO₂) y grafeno. Para ello, se llevaron a cabo ensayos fundamentales: espectrofotometría UV-Vis de las nanopartículas, degradación de colorantes y medición de absorción espectral en los morteros. Estas pruebas permitieron evaluar su rendimiento y factibilidad para su aplicación. Las actividades desarrolladas se describen a continuación:

a) Ensayo a compresión de mortero

Ensayamos las probetas de mortero para determinar variación en sus propiedades mecánicas específicamente la resistencia a la compresión según la norma ASTM C109[36] en probetas cúbicas (50x50x50 mm).

Para este ensayo se debe: Aplicar una carga mediante una prensa hidráulica hasta alcanzar la fractura.

$$f_c = \frac{P}{A} \quad 5$$

b) Espectrofotometría UV-Vis de las nanopartículas

Al realizar este ensayo se puede determinar la capacidad de absorción de luz UV-Vis de las nanopartículas de TiO_2 y grafeno utilizadas como aditivos en el mortero[37].

Se preparó las disoluciones de TiO_2 en etanol con concentraciones conocidas de 0.8, 0.4 y 0.2 mg/mL. Para la elaboración de la mezcla fotocatalítica, se optó por una técnica de mezcla mecánica manual, [37] que han demostrado la eficacia de esta metodología para lograr una distribución homogénea de los componentes. En este proceso, se combinaron dióxido de titanio (TiO_2) y grafeno en proporciones específicas como se describe en la espectrofotometría con el objetivo de potenciar las propiedades fotocatalíticas del compuesto resultante.

TABLA 1
Proporciones específicas para espectrofotometría

TiO_2 (mg)	Grafeno (mg)
20	4
40	8
80	20

FUENTE 4 Autoría Propia

La mezcla se realiza en embaces previamente etiquetados, asegurando una identificación clara de cada muestra. La agitación manual se lleva a cabo durante un tiempo 12 horas en periodos de 2 horas durante el día previo al ensayo, cabe recalcar que la maquina instantes antes del ensayo realiza una mezcla por ultrasonido, garantizando la homogeneidad de la mezcla sin la necesidad de equipos especializados. Este enfoque no solo facilita la reproducibilidad del experimento, sino que también es coherente con prácticas estudiadas en [38], donde se puede observar que la mezcla manual es efectiva para la preparación de nanocompuestos fotocatalíticos.

Es importante destacar que, aunque existen métodos más sofisticados para la preparación de estos compuestos, la elección de una técnica manual responde a la

disponibilidad de recursos y a la necesidad de adaptar los procedimientos al contexto específico del estudio. Además, esta metodología permite una mayor flexibilidad en la manipulación de las muestras y en la observación directa de las reacciones durante el proceso de mezcla. A continuación, una tabla resumen de los especímenes a ensayar, hay que tomar en cuenta que vamos a realizar un ajuste final a nuestros resultados dados por el espectrofotómetro, se resta el valor de la reacción de nuestro diluyente conocido como blanco en mi caso es el etanol al 96% lo que debemos hacer es un ajuste en cada curva restando la reacción a el espectro electromagnético entre 200 a 300 nanómetros ya que si es un valor significativo y que se debe tomar en cuenta porque se supone que después de este rango el etanol tiene absorbancias de 0.

Fig. 17 Concentraciones para espectrofotometría

	MUESTRA A ENSAYAR		CONCENTRACIONES COMBINADAS		Etanol	
B	0.2	mg/mL	24	mg	123.6	mL
C	0.4	mg/mL	48	mg	123.6	mL
A	0.8	mg/mL	100	mg	123.6	mL

FUENTE 5 Autoría propia

- **Barrido espectral:**

Se realiza un análisis de barrido entre 200 y 750 nm para identificar los picos de absorción máxima de TiO_2 y grafeno. Para las muestras A, B y C en sus proporciones 0.80, 0.40 y 0.20 mg/mL respectivamente se ha tomado:

TABLA 2
Disoluciones para ensayar

	MUESTRA A ENSAYAR		Pocillos de espectrofotómetro
C	0.40	mg/mL	12
B	0.20	mg/mL	12
A	0.80	mg/mL	12

FUENTE 6 Autoría propia

- **Medición de absorbancia**

Se mide la absorbancia de cada disolución utilizando un espectrofotómetro UV-Vis[39] en la longitud de onda máxima de absorción. Se construye una curva de calibración con los datos obtenidos, siguiendo el método de regresión lineal [40] obedeciendo a la siguiente ecuación:

$$A = a + bC$$

A = es la absorbancia,

C = es la concentración,

c) Degradación de colorante (Azul de metileno)

Evaluar la actividad fotocatalítica de los morteros dopados con TiO₂ y grafeno mediante la degradación de azul de metileno bajo luz UV. Preparación del colorante:

Se coloca el azul de metileno por peso 1 gr por un área de 25 cm².

TABLA 3
Dosificación para ensayo azul de metileno

DENOMINACION	TiO ₂ (%)	Grafeno (%)	Azul de metileno (g)
M10	0.50	0.05	1.00
M11	0.50	0.50	1.00
M12	0.50	1.00	1.00
M13	2.00	0.05	1.00
M14	2.00	0.50	1.00
M15	2.00	1.00	1.00
M16	5.00	0.05	1.00
M17	5.00	0.50	1.00
M18	5.00	1.00	1.00
MP4			
MP5			
MP6			

FUENTE 7 Autoría propia

Aplicación sobre el mortero:

Se aplica la solución sobre las muestras de mortero (5×5×5 cm) mediante recubrimiento o impregnación breve.

Exposición a luz UV:

Las muestras se colocaron bajo la exposición a la luz natural durante períodos definidos de 7, 14 y 28 días después de su curado. Se tomaron fotografías en cada intervalo para documentar visualmente el proceso de degradación.

Análisis visual y semicuantitativo:

Se compararon las imágenes antes y después de la exposición. Utilizando el software gratuito ImageJ. Este software nos permite y tomando medidas por medio de las fotografías de forma precisa para su posterior caracterización y resultados.

Nota: Este método se considera válido como técnica semicuantitativa en ausencia de métodos avanzados como HPLC o espectrofotometría in situ. La documentación fotográfica aporta respaldo visual del proceso de decoloración. [41]

d) Medición de absorción espectral en morteros

Caracterizar ópticamente diferentes muestras sólidas curadas y posteriormente destruidas en el ensayo a compresión, mediante la medición de su absorbancia en el rango ultravioleta (UV) y visible (VIS), con el fin de evaluar la presencia, concentración y comportamiento óptico de materiales absorbentes (como TiO₂, grafeno u otros compuestos aplicados).

Se utilizó la espectrofotometría uv-visible (UV-VIS) para obtener la absorbancia de cada muestra a tres longitudes de onda representativas:

Preparación de las muestras

Se analizaron nueve muestras identificadas como M19 a M27, las cuales fueron previamente ensayadas a compresión procesadas y tratadas es decir disueltas en el solvente etanol al 96% anteriormente descrito para otro ensayo. Se colocó una parte de cada muestra en

pocillos separados de una placa de 96 pocillos, asegurando el mismo volumen en cada uno.

Parámetros de medición

Las mediciones de absorbancia se realizaron a las siguientes longitudes de onda:

Fig. 18 Longitudes de onda y rango espectral

Longitud de onda	Rango espectral
254 nm	UV lejano
366 nm	UV cercano
VIS	Rango visible (aproximadamente entre 420–450 nm)

FUENTE 8 Autoría propia

Las muestras fueron analizadas contra un blanco Etanol al 96%.

Registro y procesamiento de datos

Los valores de absorbancia fueron recolectados y organizados en hojas de cálculo para su posterior análisis. Se aplicaron herramientas estadísticas descriptivas para obtener:

- Promedios por longitud de onda
- Comparaciones entre muestras

3) Generación de corriente eléctrica

Con el objetivo de evaluar la capacidad de generación de corriente eléctrica inducida por radiación UV, se diseñó un sistema experimental un poco improvisado pero funcional, utilizando muestras de mortero dopado con dióxido de titanio (TiO_2) y grafeno. En esta etapa metodológica se fundamentó en estudios previos que reportan la generación de pares electrón-hueco en el TiO_2 al ser irradiado con luz UV, lo que permite convertir energía lumínica en energía eléctrica bajo ciertas condiciones según [42] Las muestras fueron elaboradas a partir de morteros de cemento dopados con TiO_2 y óxido de grafeno reducido (rGO). Posteriormente, se aplicó sobre la superficie una lechada semilíquida de los

misimos materiales, con el propósito de mejorar el contacto superficial con la luz y la transferencia de carga. En cada muestra se insertó un alambre conductor de acero inoxidable, asegurando que estuviera embebido parcialmente en el mortero y en contacto directo con la lechada activa. Este alambre actuó como electrodo colector dentro del sistema. Una vez preparadas, las muestras se dejaron secar completamente antes del ensayo experimental.

Dado que no se encontraron en el país materiales específicos ni infraestructura adecuada para construir una celda fotovoltaica especializada, se optó por un sistema improvisado que permitiera validar de forma preliminar el concepto de generación de corriente. El ensayo consistió en conectar el electrodo embebido en la muestra a un multímetro, completando el circuito con un contraelectrodo (cátodo) sumergido en una solución salina. Bajo irradiación UV-A, se midió cualquier diferencia de potencial o corriente inducida por el fenómeno fotocatalítico, cabe recalcar que por no contar con equipos de alta precisión ya se sabía que era muy poco probable poder tener una medición.

Esta propuesta representa un primer intento experimental para explorar la posibilidad de capturar energía eléctrica mediante materiales fotocatalíticos incorporados en matrices de cemento. Debido a las limitaciones técnicas y materiales disponibles en Ecuador, el ensayo se realizó de manera improvisada, utilizando recursos accesibles. Sin embargo, este enfoque representa un avance hacia investigaciones futuras más profundas y especializadas. Tal y como se menciona en el objetivo específico de esta tesis, esta investigación se plantea como un estudio semilla, que busca sentar las bases para desarrollos posteriores en el campo de los materiales multifuncionales aplicados a la construcción sostenible y a la conversión hacia energías limpias.

4) Determinación de capacidad Autolimpiarte por el ensayo de rodamina B

En la última fase, adopto el diseño metodológico experimental y analítico en donde se evaluó la actividad fotocatalítica de especímenes de mortero de cemento Portland tipo I modificados con diferentes concentraciones de dióxido de titanio (TiO_2) y grafeno, utilizando el método colorimétrico de fotodegradación de Rodamina B, conforme al artículo científico [43].

a) Fotodegradación bajo luz simulada de Rodamina B

Se elaboraron especímenes cúbicos de 5 cm × 5 cm × 5 cm con las siguientes proporciones:

TABLA 4
Dosificación para cubos de 5x5x5 cm

Componente	Cantidad (g)	Observación
Cemento	46.63	Constante en todas las muestras
Arena	186.53.11	Constante en todas las muestras
Agua	33.11	Constante en todas las muestras
Dióxido de Titanio (TiO ₂)	0.23 – 2.33	Corresponde a concentraciones del 0.5% al 5.0% a peso del cemento.
Grafeno	0.02 – 0.47	Corresponde a concentraciones del 0.05% al 1.0% a peso del cemento.

Las mezclas se nombraron de la M1 a la M9, de acuerdo con la siguiente variación en los aditivos principales:

- TiO₂: 0.5%, 2.0%, y 5.0%
- Grafeno: 0.05%, 0.5%, y 1.0%

También se incluyeron muestras patrón (MP1, MP2 y MP3) sin adición de nanopartículas, para comparar los efectos fotocatalíticos.

3. Aplicación del colorante

Una vez endurecidos los especímenes, se aplicó una solución de Rodamina B con una concentración de 0.02 g/100 mL de agua sobre la superficie de cada muestra.

4. Exposición a luz ultravioleta

Las muestras de mortero recubiertas con Rodamina B fueron expuestas a radiación ultravioleta de onda larga (UV-A) con el objetivo de evaluar su actividad fotocatalítica. Para ello se utilizó el equipo CAMAG TLC Visualizer 3, el cual emite luz UV-A con una longitud de onda de 365 nm. Las muestras se colocaron a una distancia de 50 cm de la

fuentes de luz dentro de la cámara del equipo, manteniendo condiciones homogéneas de exposición.

El tiempo total de exposición considerado fue de 4 horas para la primera etapa y 26 horas para la segunda. La exposición de 4 horas fue realizada en intervalos controlados, divididos en sesiones de menor duración, con el fin de prevenir riesgos derivados de la exposición prolongada a la radiación UV-A, tanto para los operadores como para evitar un posible sobrecalentamiento del equipo.

Los resultados de R_4 y R_{26} permiten determinar si existe actividad fotocatalítica. Según la bibliografía [44] un material se considera fotocatalítico si cumple. Se registraron los datos de absorbancia inicial y posterior para cada muestra. Posteriormente, se calcularon y analizaron los promedios por grupo de tratamiento.

Finalmente, se realizará el análisis estadístico utilizando Microsoft Excel para datos preliminares y softwares para identificar tendencias y correlaciones avanzadas entre las concentraciones de aditivos y las eficiencias fotocatalíticas y autolimpiantes.

CAPITULO III-RESULTADOS Y DISCUSION

A. Análisis y discusión de resultados

A continuación, se presentan todos los resultados recolectados a lo largo del desarrollo de los ensayos descritos en la metodología previamente seleccionados. Estos resultados se han procesado por medio de Excel en tablas y gráficos para un mejor entendimiento.

1) Fase1

a) Dosificación y preparación del mortero.

Se realizó una investigación profunda para determinar métodos de dosificación actualizados, pero se debe aclarar que bajo la revisión de varios libros en los que la dosificación para morteros era descartada o simplemente empírica se encontró en [45] una metodología descrita anteriormente, aceptada y que fácilmente puede ser replicada. En primer lugar, se obtuvo:

- Granulometría de agregado fino

En la granulometría de mi agregado fino obtuve como resultado que cumple con los límites establecidos por la norma ASTM C33 [16] como se observa en la Fig. 19

Granulometría

el módulo de finura es de 2.44 % cumpliendo de igual forma con la norma recomendación de la norma NTE INEN 872 [46] que establece un rango entre 2.30 y 3.10 para materiales finos.

Fig. 19 Granulometría

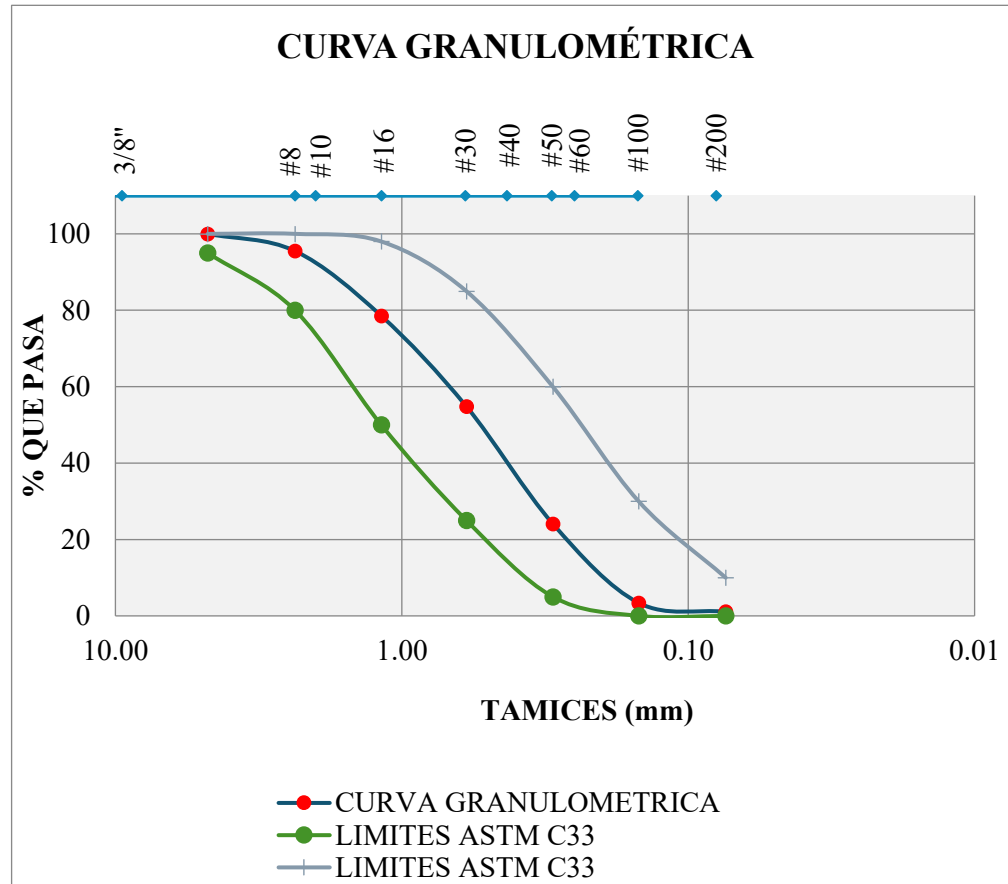


TABLA 5
Densidad real de agregado fino

DENSIDAD REAL AGREGADO FINO			
DATOS	DESIGNACION	UNIDAD	VALOR
M1	Masa del picnometro	gr	144.50
M2	Masa del picnometro + muestra SSS	gr	644.50
M3	Masa de picnometro + muestra SSS + agua	gr	949.10
M4= M3-M2	Masa agua añadida	gr	304.60
M5	Masa picnometro + 500cc de agua	gr	644.50
M6=M5-M1	Masa de 500 cc de agua	gr	500.00
DA=M6/500cm3	Densidad del agua	gr/cm3	1.00
M7=M6-M4	Masa del agua desalojada por la muestra	gr	195.40
Msss= M2-M1	Masa del agregado	gr	500.00
Vsss=M7/DA	Volumen del agua desalojada	cm3	195.40
DRA= Msss/Vsss	Densidad real de la arena	gr/cm3	2.56

FUENTE 10 Autoría propia

- Densidad real del cemento

Se obtuvo un valor de 3.02 gr/cm³ para la densidad real del cemento. Como se observa en la TABLA 6 Densidad del cemento, este resultado es considerado normal bajo condiciones normales para un cemento tipo GU.

TABLA 6
Densidad del cemento.

Cálculo de la Densidad Real				
DATOS	DESIGNACION	UNIDAD	VALOR	
Ma	Masa del frasco + gasolina	gr	321	321
V1	Lectura inicial de la gasolina	cm3	0.6	0.6
Mp	Masa del frasco + gasolina + cemento	gr	387	385.9
V2	Lectura Final de la gasolina	cm3	22.4	22.2
V3= V2-V1	Volumen Desalojado de gasolina	cm3	21.8	21.6
Mc= Mp-Ma	Masa del cemento usado	gr	66	64.9
DRC = Mc/V3	Densidad del cemento	gr/cm3	3.03	3.00
	Densidad real promedio	gr/cm3	3.02	

FUENTE 11 Autoría propia

- Dosificación por cubos de 5x5x5 cm

Para la preparación de las muestras cúbicas de mortero de 5×5×5 cm (125 cm³), se utilizó una dosificación base equivalente a 1 m³ de mezcla, conforme a las proporciones

mostradas en la TABLA 7
Dosificación para 1m³

TABLA 7
Dosificación para 1m³

DATOS TABULADOS				
	PESO Kg	Peso Especifico	Volumen Ltr	m ³
CEMENTO	373	3.02	124	0.1
ARENA	1492	2.44	612	0.6
AGUA	264.88	1	265	0.3
			1000	1

FUENTE 12 Elaboración propia

Ahora lo interpolamos para 0.125 m³ según la TABLA 8
Dosificación para 125 m³

TABLA 8
Dosificación para 125 m³

DATOS TABULADOS				
	PESO Kg	Peso en gramos	Peso Especifico	Volumen Ltr
CEMENTO	0.04663	46.63	3.02	0.015
ARENA	0.18653	186.53	2.44	0.076
AGUA	0.03311	33.11	1	0.033
				0.125

FUENTE 13 Elaboración propia

- Dosificación para muestras

Para la elaboración de los cubos de mortero de 5×5×5 cm, se prepararon 27 mezclas experimentales (M1–M27) y 9 muestras patrón (MP1–MP9), utilizando una dosificación base por cubo previamente establecida: 46.63 g de cemento, 186.53 g de arena y 33.11 g de agua. A esta base se incorporaron distintas proporciones de dióxido de titanio (TiO₂) y grafeno, con el objetivo de evaluar la influencia de estos aditivos en el comportamiento del mortero. Las concentraciones de TiO₂ utilizadas fueron del 0.5%, 2% y 5% con respecto al peso de cemento, mientras que las de grafeno fueron del 0.05%, 0.5% y 1.0%, también referidas al peso del cemento. Estas proporciones resultaron en las siguientes masas añadidas:

TABLA 9
Dosificación de muestras

DOSIFICACIÓN							
DENOMINACION	CEMENTO (g)	ARENA (g)	AGUA (g)	TiO ₂ (%)	Grafeno (%)	DIOXIDO DE TITANIO (g)	GRAFENO (g)
M1	46.63	186.53	33.11	0.50	0.05	0.23	0.02
M2	46.63	186.53	33.11	0.50	0.50	0.23	0.23
M3	46.63	186.53	33.11	0.50	1.00	0.23	0.47
M4	46.63	186.53	33.11	2.00	0.05	0.93	0.02
M5	46.63	186.53	33.11	2.00	0.50	0.93	0.23
M6	46.63	186.53	33.11	2.00	1.00	0.93	0.47
M7	46.63	186.53	33.11	5.00	0.05	2.33	0.02
M8	46.63	186.53	33.11	5.00	0.50	2.33	0.23
M9	46.63	186.53	33.11	5.00	1.00	2.33	0.47
M10	46.63	186.53	33.11	0.50	0.05	0.23	0.02
M11	46.63	186.53	33.11	0.50	0.50	0.23	0.23
M12	46.63	186.53	33.11	0.50	1.00	0.23	0.47
M13	46.63	186.53	33.11	2.00	0.05	0.93	0.02
M14	46.63	186.53	33.11	2.00	0.50	0.93	0.23
M15	46.63	186.53	33.11	2.00	1.00	0.93	0.47
M16	46.63	186.53	33.11	5.00	0.05	2.33	0.02
M17	46.63	186.53	33.11	5.00	0.50	2.33	0.23
M18	46.63	186.53	33.11	5.00	1.00	2.33	0.47
M19	46.63	186.53	33.11	0.50	0.05	0.23	0.02
M20	46.63	186.53	33.11	0.50	0.50	0.23	0.23
M21	46.63	186.53	33.11	0.50	1.00	0.23	0.47
M22	46.63	186.53	33.11	2.00	0.05	0.93	0.02
M23	46.63	186.53	33.11	2.00	0.50	0.93	0.23
M24	46.63	186.53	33.11	2.00	1.00	0.93	0.47
M25	46.63	186.53	33.11	5.00	0.05	2.33	0.02
M26	46.63	186.53	33.11	5.00	0.50	2.33	0.23
M27	46.63	186.53	33.11	5.00	1.00	2.33	0.47
MP1	46.63	186.53	33.11				
MP2	46.63	186.53	33.11				
MP3	46.63	186.53	33.11				
MP4	46.63	186.53	33.11				
MP5	46.63	186.53	33.11				
MP6	46.63	186.53	33.11				
MP7	46.63	186.53	33.11				
MP8	46.63	186.53	33.11				
MP9	46.63	186.53	33.11				

FUENTE 14 Autoría Propia

2) Fase 2

Caracterización de propiedades fotocatalíticas

a) Ensayo a compresión

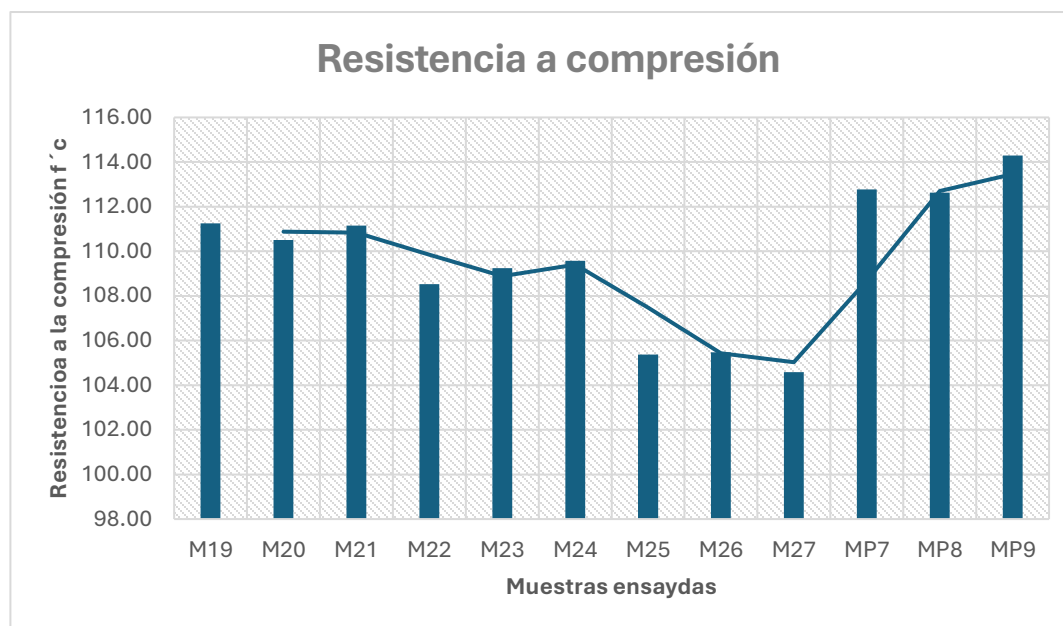
Se ensayó a compresión las probetas cúbicas (50×50×50 mm) conforme a la norma ASTM C109[47], a los 28 días con el objetivo de evaluar el efecto del dopaje con nanopartículas de dióxido de titanio (TiO₂) y grafeno en las propiedades mecánicas del mortero. Las muestras patrón (MP7–MP9), sin adición de nanopartículas, presentaron las mayores resistencias, con un promedio de 112.83 kg/cm², lo que representa el comportamiento base del mortero convencional sin dopaje.

TABLA 10
Ensayo a compresión

Muestra	% TiO ₂	% Grafeno	Resistencia (kg/cm ²)	Observaciones
M19	0.50	0.05	111.26	Superficies compactas
M20	0.50	0.50	110.51	Ligeramente más porosa
M21	0.50	1.00	111.16	Buena dispersión
M22	2.00	0.05	108.53	Sin defectos visibles
M23	2.00	0.50	109.25	Superficie ligeramente rugosa
M24	2.00	1.00	109.57	Ligera segregación
M25	5.00	0.05	105.38	Pérdida de trabajabilidad
M26	5.00	0.50	105.47	Superficie con fisuras leves
M27	5.00	1.00	104.59	Disminución notable de cohesión
MP7	0.00	0.00	112.05	
MP8	0.00	0.00	112.16	
MP9	0.00	0.00	114.29	

FUENTE 15 Autoría propia

Fig. 20 Resultado de ensayo a compresión



FUENTE 16 Autoría propia

En comparación con las muestras patrón, la mayoría de las mezclas dopadas con TiO_2 y grafeno mostraron una disminución moderada en la resistencia mecánica a los 28 días. Esta tendencia fue más notoria en las formulaciones con mayor contenido de nanopartículas, particularmente aquellas con 5.00% de TiO_2 .

No obstante, algunas combinaciones mostraron comportamientos aceptables en cuanto a resistencia. Por ejemplo, la muestra M21 (0.50% TiO_2 + 1.00% grafeno) alcanzó una resistencia de 111.16 kg/cm², destacando por su buena dispersión y sin defectos visibles. De manera similar, la muestra M22 (2.00% TiO_2 + 0.05% grafeno) obtuvo 108.53 kg/cm², sin presentar defectos aparentes, lo que indica una adecuada integración de los nanomateriales en proporciones controladas.

En contraste, las mezclas con la mayor concentración de TiO_2 (5.00%) como M25, M26 y M27 registraron las resistencias más bajas del grupo (entre 105.38 y 105.47 kg/cm²). Estas muestras también presentaron observaciones desfavorables, como pérdida de trabajabilidad, fisuras leves y disminución notable de cohesión, lo que sugiere que concentraciones elevadas de nanopartículas pueden alterar negativamente la estructura interna del mortero y comprometer su desempeño mecánico.

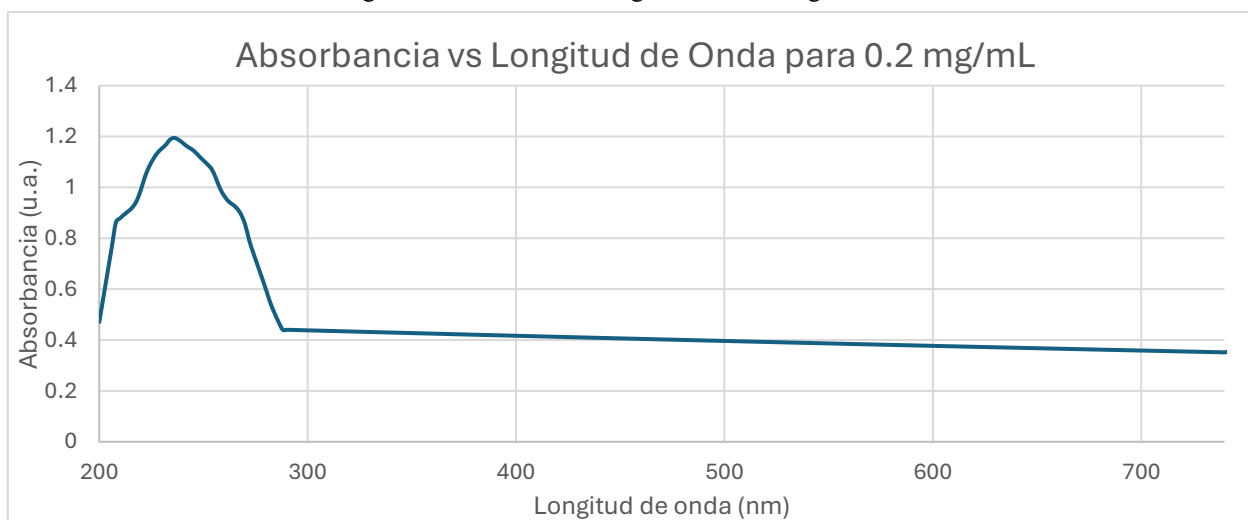
Por otro lado, las muestras patrón MP7, MP8 y MP9, sin adición de nanopartículas, lograron resistencias superiores, entre 112.05 y 114.29 kg/cm², lo cual respalda su uso como referencia y refleja el comportamiento esperado para un mortero sin modificaciones

Espectrofotometría UV-Vis de las nanopartículas

Se analizó la respuesta óptica de las nanopartículas utilizadas como aditivos en morteros, se llevó a cabo un ensayo de espectrofotometría UV-Vis utilizando soluciones combinadas de dióxido de titanio (TiO₂) y grafeno en etanol. Las concentraciones fueron cuidadosamente seleccionadas y se prepararon mediante una mezcla mecánica manual complementado con agitación por ultrasonido, en un proceso que garantizó una dispersión homogénea de los compuestos. Las muestras analizadas fueron (0.20 mg/mL), (0.40 mg/mL) y (0.80 mg/mL), y se evaluaron mediante barrido espectral en el rango de 200 a 750 nm.

Muestra con concentración (0.20 mg/mL)

Fig. 21 Absorbancia vs Long de Onda 0.2 mg/mL



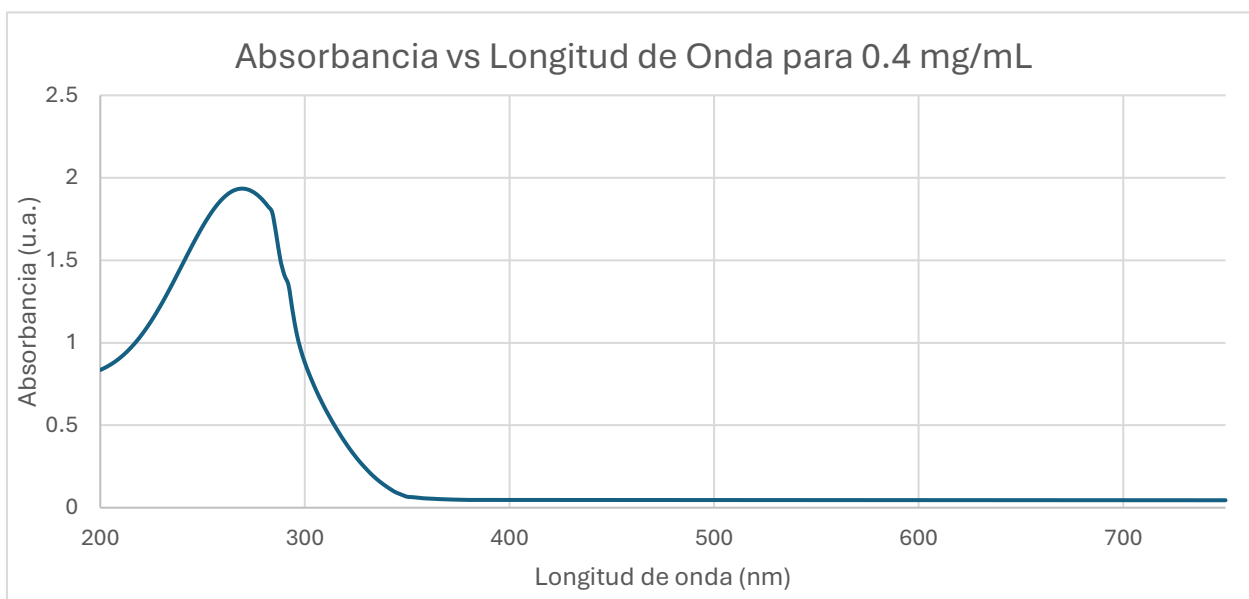
FUENTE 17 Autoría propia

Esta muestra, correspondiente a la menor concentración, presentó los valores más bajos de absorbancia en todo el rango analizado. Su curva mostró un comportamiento estable, sin picos demasiado pronunciados, pero con una leve absorción entre 200 y 300

nm, correspondiente a la región de mayor actividad del TiO_2 . Esta baja respuesta se atribuye directamente a la escasa cantidad de nanopartículas presentes en la solución, lo cual limita la interacción con la radiación UV y reduce su eficacia fotocatalítica. No obstante, el perfil espectral se mantuvo consistente, lo que sugiere que incluso a bajas concentraciones hay cierta actividad óptica.

Muestra con concentración (0.40 mg/mL)

Fig. 22 Absorbancia vs Long de Onda 0.4 mg/mL

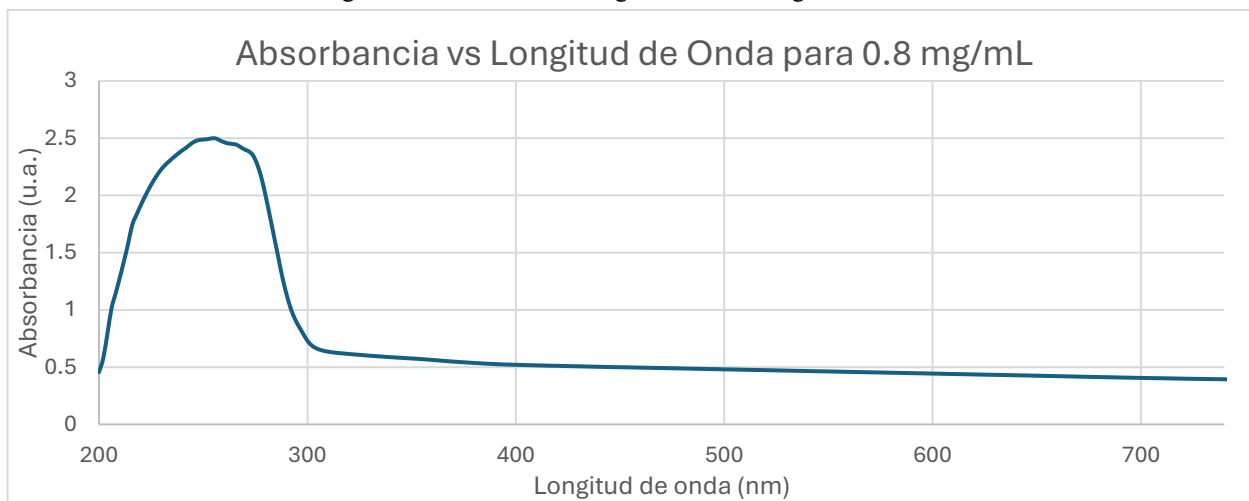


FUENTE 18 Autoría propia

Al aumentar la concentración a 0.40 mg/mL, se observa un incremento notable en los valores de absorbancia, especialmente en el rango de 250–350 nm. En comparación con la concentración 0.2 mg/mL es más pronunciada y muestra una mayor densidad óptica, lo que indica una mayor interacción de la mezcla con la radiación UV. Esto refleja una mejor presencia y dispersión de nanopartículas en la solución, que comienzan a evidenciar un comportamiento fotocatalítico más efectivo. También se observa una ligera expansión de la curva hacia la zona visible (>400 nm), lo cual puede atribuirse al efecto del grafeno en la mezcla.

Muestra con concentración (0.80 mg/mL)

Fig. 23 Absorbancia vs Long de Onda 0.8 mg/mL



FUENTE 19 Autoría propia

La muestra con la concentración más alta de nanopartículas 0.8 mg/mL. Esta solución presentó los valores de absorbancia más elevados entre todas las analizadas. La curva correspondiente muestra un pico mucho más marcado entre 270 y 300 nm, y una presencia más notoria en todo el espectro UV. Esto evidencia que, al incrementar la cantidad de nanomateriales, la capacidad de absorción de luz aumenta considerablemente. Además, se refuerza el efecto combinado del TiO_2 y grafeno, logrando una absorción sostenida incluso en el inicio de la región visible. Este resultado sugiere que una mayor concentración no solo mejora la actividad fotocatalítica, sino que también puede tener implicaciones positivas para aplicaciones con luz natural.

El análisis del barrido espectral completo confirma que existe una relación directa entre la concentración de nanopartículas en la mezcla y la absorbancia registrada. Todas las muestras mostraron una respuesta clara en el rango UV, con un pico de absorción más definido entre los 250 y 350 nm, correspondiente al TiO_2 . Por su parte, el grafeno contribuye extendiendo el espectro hacia longitudes de onda mayores, lo que se observa con mayor claridad en las muestras de mayor concentración. Esto respalda la idea de que la combinación de ambos nanomateriales tiene un efecto sinérgico sobre la capacidad de

absorción de radiación, lo que resulta relevante al momento de considerar su uso en aplicaciones fotocatalíticas para morteros fotocatalíticos o descontaminantes.

Estos hallazgos coinciden con estudios previos que han demostrado que la incorporación de grafeno en nanocompuestos de TiO_2 mejora la absorción de luz en el rango visible y reduce la recombinación de pares electrón-hueco, aumentando así la eficiencia fotocatalítica. Por ejemplo, Wang et al[48]. Se ha observado que los nanocompuestos de TiO_2 con óxido de grafeno presentan una mayor absorción en el espectro visible y una mejor separación de cargas, lo que mejora su actividad fotocatalítica.

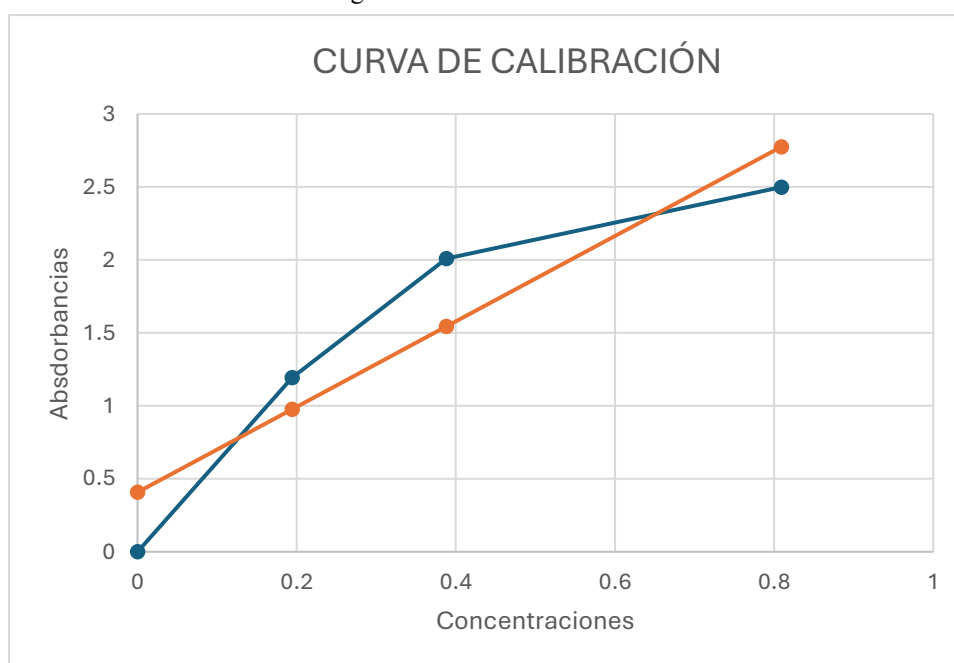
Curva de Calibración

La curva de calibración obtenida a partir de las soluciones combinadas de dióxido de titanio (TiO_2) y grafeno en etanol permitió establecer una relación lineal entre la concentración de nanopartículas y la absorbancia como se observa en la en el rango UV-Visible. La ecuación 7 de ajuste lineal obtenida fue:

$$Y = 0.4082 + 2.9253 \cdot X$$

7

Fig. 24 Curva de calibración



FUENTE 20 Autoría propia

El coeficiente de correlación ($R = 0.926$) indica un ajuste adecuado de los datos ya que mientras más cercano al 1 es más preciso el modelo lineal, lo que respalda la validez de la interpolación para estimar concentraciones a partir de valores de absorbancia. Esta relación lineal es coherente con la teoría de la ley de Beer-Lambert[49], donde la absorbancia se incrementa proporcionalmente con la concentración de especies absorbentes, siempre que no haya interferencias significativas.

Al analizar las tres concentraciones seleccionadas (0.20, 0.40 y 0.80 mg/mL), se observó un aumento progresivo de la absorbancia, tal como predice la curva. Este comportamiento confirma que las soluciones estaban bien dispersas y que el sistema óptico respondía de forma consistente a la variación en la cantidad de nanomateriales.

La muestra de 0.20 mg/mL mostró una absorbancia baja y estable, lo que se refleja en su punto más bajo dentro de la curva. Esto valida la observación experimental de una actividad fotocatalítica limitada pero presente, coherente con la baja densidad óptica.

La muestra de 0.40 mg/mL se ubica en un punto intermedio de la curva, con una pendiente ascendente clara. La mejora en la respuesta óptica observada en los espectros coincide con el incremento en absorbancia predicho por la curva, evidenciando una mejor dispersión y mayor densidad de nanopartículas activas.

La muestra de 0.80 mg/mL, al situarse en el punto más alto de la curva de calibración, presentó la mayor absorbancia registrada. Esto refuerza el análisis cualitativo, donde se identificó una mayor absorción en el UV y una prolongación hacia el visible atribuible al efecto sinérgico entre TiO_2 y grafeno.

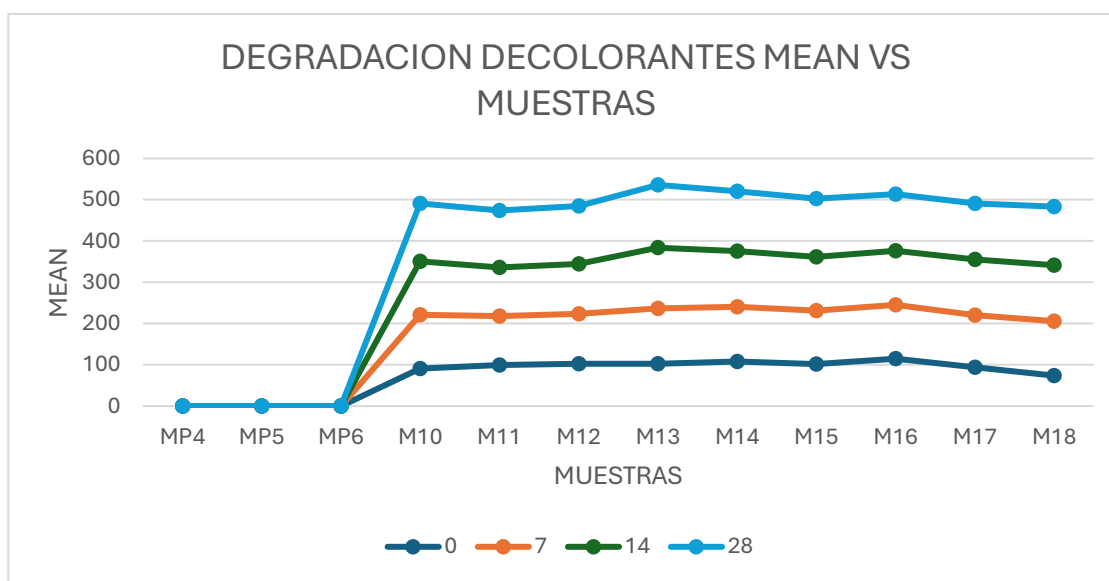
En conjunto, la curva de calibración no solo permitió interpolar concentraciones desconocidas con base en la absorbancia, sino que también brindó un marco cuantitativo para correlacionar los resultados espectrales con el comportamiento fotocatalítico esperado. La linealidad de la curva demuestra que, dentro del rango analizado, no hay saturación óptica ni efectos de dispersión que invaliden la proporcionalidad, lo cual es crucial para futuras aplicaciones prácticas.

Estos resultados respaldan la elección de las concentraciones utilizadas en las mezclas de mortero, al garantizar que cada nivel de adición de nanopartículas tiene un impacto medible y predecible en la capacidad de absorción de radiación UV-Vis, lo que se traduce en un potencial fotocatalítico directamente relacionado con el contenido de TiO_2 y grafeno.

b) Degradación de colorante (Azul de metileno)

La Fig. 25, presenta la evolución de la intensidad media (Mean) del colorante azul de metileno aplicado sobre las superficies de los morteros modificados con nanopartículas de TiO_2 y grafeno, evaluada en los días 0, 7, 14 y 28 mediante el software ImageJ. Se observa que, en todas las muestras, el valor de Mean aumenta progresivamente con el tiempo, lo que evidencia una pérdida de color en la superficie y, por ende, la acción fotocatalítica del material.

Fig. 25 Degradación de colorantes



FUENTE 21 Autoría Propia

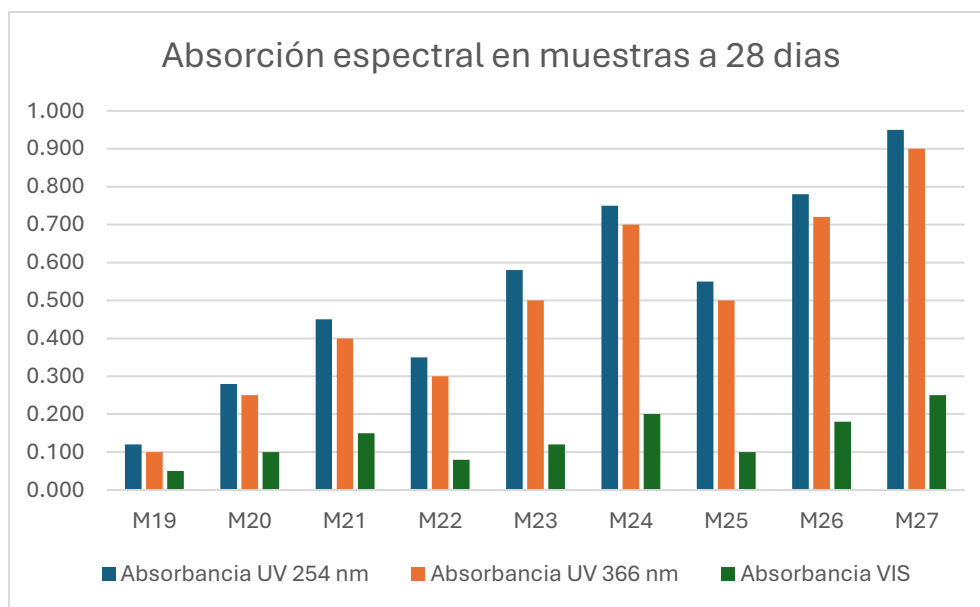
Las muestras M14 y M15 destacan por presentar los valores de Mean más altos al día 28, alcanzando aproximadamente 550 unidades. Este comportamiento sugiere que estas composiciones poseen la mayor eficacia en la degradación del colorante, posiblemente por una adecuada relación entre TiO_2 y grafeno que favorece la generación

y separación de pares electrón-hueco bajo exposición solar. Por el contrario, la muestra M18 mostró los valores más bajos de Mean durante todo el ensayo, con un máximo cercano a 460 unidades al día 28, lo que indica una menor capacidad fotocatalítica. Esto podría atribuirse a una concentración excesiva de grafeno, que tiende a formar aglomerados y bloquear los sitios activos del TiO_2 .

Adicionalmente, se evidencia que la mayor parte del cambio ocurre entre los días 0 y 7, y luego la pendiente se reduce entre los días 14 y 28, lo que sugiere que la degradación es más eficiente en las primeras etapas de exposición. Este patrón es coherente con lo reportado en la literatura para sistemas con actividad fotocatalítica superficial. En conjunto, estos resultados permiten identificar a las muestras M13 y M14 como las formulaciones más prometedoras para aplicaciones autolimpiantes, combinando una alta eficiencia en la degradación de contaminantes con una evolución sostenida en el tiempo.

c) Medición de absorción espectral en morteros

Fig. 26 Absorción espectral de luz en morteros.



FUENTE 22 Autoría propia

Se evaluaron nueve muestras de mortero identificadas como M19 a M27, las cuales fueron disueltas en etanol al 96% para su análisis espectrofotométrico. La medición de

absorbancia se realizó a tres longitudes de onda representativas: 254 nm (UV lejano), 366 nm (UV cercano) y una correspondiente al rango visible (aproximadamente entre 420 y 450 nm). Los resultados obtenidos evidencian un incremento progresivo en los valores de absorbancia desde la muestra M19 hasta la M27, lo cual indica una mayor concentración o eficiencia óptica de los materiales activos, como TiO_2 y grafeno, en las formulaciones más avanzadas.

En el caso de la longitud de onda de 254 nm, la absorbancia aumentó desde 0.12 en la muestra M19 hasta 0.95 en la M27, lo que sugiere una mayor cantidad o mejor dispersión de los compuestos absorbentes. A 366 nm, se observó una tendencia similar, con valores de absorbancia que incrementaron de 0.10 a 0.90 en el mismo rango de muestras. Aunque los valores registrados en el espectro visible fueron menores, también mostraron un aumento relevante, pasando de 0.05 (M19) a 0.25 (M27), lo que evidencia que las muestras con mayor contenido de aditivos también presentan actividad óptica en el rango visible, aspecto clave para aplicaciones que implican exposición a luz solar.

Estos resultados están en consonancia con estudios previos. Por ejemplo, Acosta-Esparza et al.[50] demostraron que la combinación de TiO_2 con grafeno mejora significativamente la absorción de radiación y la degradación de contaminantes tanto bajo luz UV como visible, lo que coincide con el comportamiento observado en nuestras muestras más avanzadas. Asimismo, Yang et al.[51] reportaron que materiales porosos compuestos de TiO_2 /grafeno presentan una eficiencia óptica superior debido a la sinergia entre ambos componentes, que favorece la separación de cargas y la absorción de luz, fenómeno reflejado particularmente en las muestras M24 a M27. Por otro lado, Santos et al. (2024) destacaron la mejora en las propiedades mecánicas del mortero al incorporar óxido de grafeno. En nuestro caso, aunque las muestras analizadas fueron previamente ensayadas a compresión, esto no afectó negativamente su evaluación óptica posterior, lo que refuerza la compatibilidad entre desempeño mecánico y comportamiento espectral.

En conjunto, el aumento progresivo de la absorbancia observado en las muestras sugiere que aquellas con mayor carga de aditivos, especialmente M24 a M27, exhiben un mejor desempeño óptico. Este comportamiento es altamente deseable para

aplicaciones en materiales fotocatalíticos, autolimpiantes o protectores superficiales, donde la interacción con la luz es fundamental. Además, la actividad observada en el rango visible amplía el potencial de uso de estos materiales bajo condiciones de iluminación natural, lo que representa una ventaja significativa en términos de eficiencia y sostenibilidad.

d) Generación de corriente eléctrica.

Durante la fase experimental destinada a evaluar la generación de corriente eléctrica en los morteros dopados con dióxido de titanio (TiO_2) y óxido de grafeno reducido (rGO), en todas las réplicas ensayadas, se observó una leve variación en la lectura del multímetro digital al momento de irradiar las muestras con luz ultravioleta, lo cual sugiere la existencia de una actividad fotocatalítica capaz de inducir movimiento de cargas eléctricas. No obstante, estas variaciones fueron extremadamente pequeñas e inestables, lo que imposibilitó su cuantificación con equipos de medición convencionales. La escala de generación de corriente está por debajo del umbral de sensibilidad del multímetro utilizado, lo que es coherente con lo reportado en la literatura, donde se requieren sistemas de detección más sensibles, como celdas electroquímicas potenciostáticas y medidores de microcorrientes conectados a sistemas de adquisición computarizada Wang et al[52].

El comportamiento observado es coherente con la teoría del mecanismo de generación de pares electrón-hueco en el TiO_2 bajo radiación UV, especialmente cuando se encuentra en contacto con un conductor eléctrico y un medio ionizado (como la solución salina empleada). Sin embargo, las condiciones experimentales y la improvisación del sistema limitaron la precisión de los resultados. En resumen, aunque no se logró medir cuantitativamente la corriente generada, se verificó la existencia de una respuesta eléctrica inducida por la radiación UV, lo que valida parcialmente la hipótesis planteada y como se plantea en los objetivos específicos la necesidad de realizar futuras investigaciones con instrumentación especializada, y un amplio tiempo para la investigación.

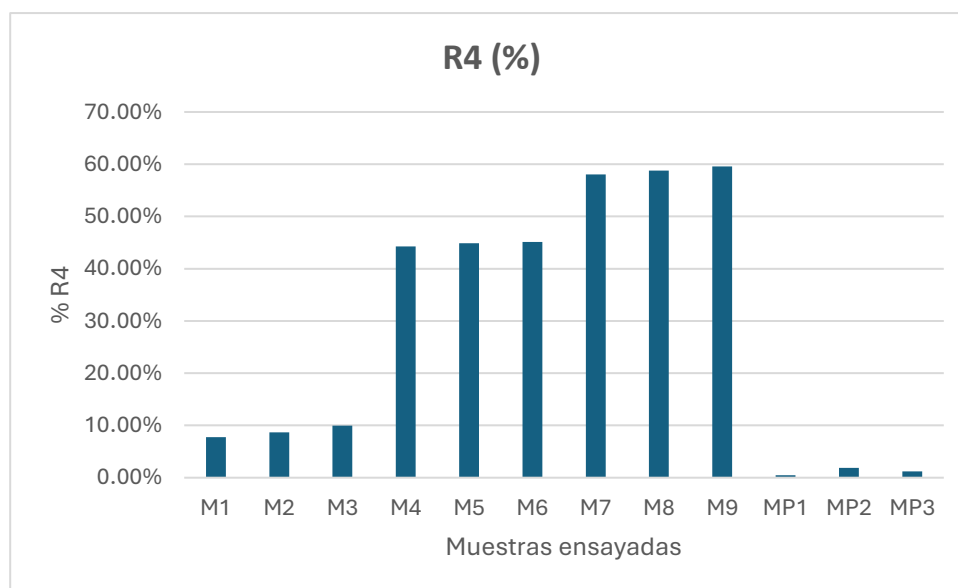
3) Fase 3

a) Fotodegradación bajo luz simulada de Rodamina B

El ensayo con rodamina B permitió evaluar la actividad fotocatalítica de los morteros dopados con nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) y grafeno, bajo condiciones controladas de radiación UV-A, siguiendo el procedimiento de la norma UNI 11259[53]. En este ensayo se calcularon los valores de R_4 (%) y R_{26} (%), que representan el porcentaje de decoloración del colorante luego de 4 y 26 horas de exposición, respectivamente, en comparación con la absorbancia inicial.

En la **Figura 27**, se observa que la muestra M9, compuesta por 5 % de TiO_2 y 1 % de grafeno, presentó el valor más alto de decoloración, alcanzando aproximadamente 59.5 %. Le siguen las muestras M8 y M7, también con altas concentraciones de TiO_2 y cantidades variables de grafeno, lo que evidencia que una mayor carga de TiO_2 potencia la fotodegradación. Estas muestras mostraron una clara superioridad respecto al resto, indicando una eficiencia fotocatalítica elevada.

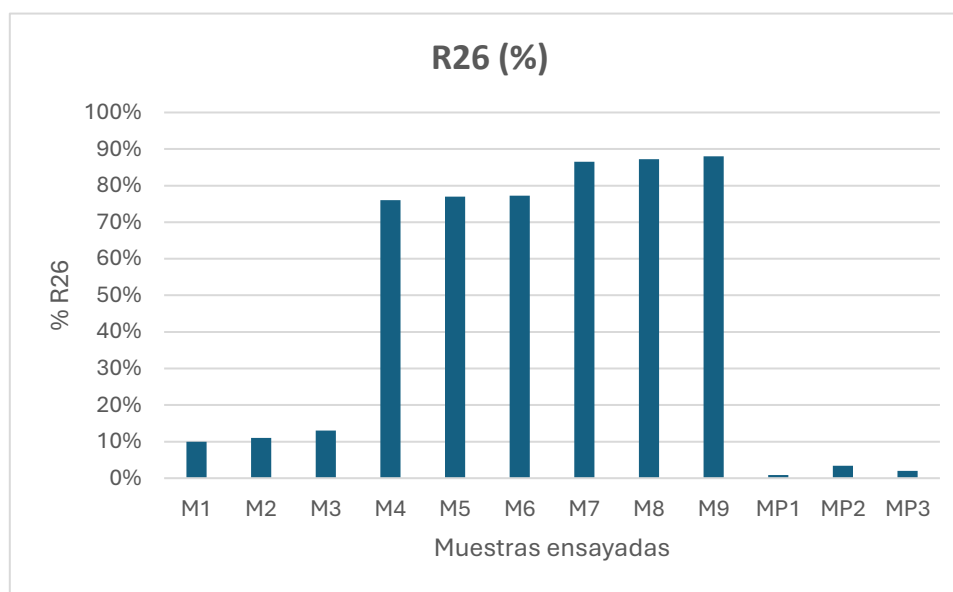
Fig. 27 Fotodegradación de morteros a 4 horas



FUENTE 23 Autoría propia

En la ($R_{26} \%$), se evidencia una tendencia general de aumento en los valores de decoloración con el tiempo, como es esperado. Las muestras M9, M8 y M7 alcanzaron valores cercanos al 90 %, consolidando su comportamiento sobresaliente también a largo plazo. Este resultado demuestra que, además de una respuesta inicial fuerte, estas formulaciones mantienen una capacidad sostenida de degradación del colorante con el paso de las horas.

Fig. 28 Fotodegradación de morteros a 26 horas



FUENTE 24 Autoría Propia

En contraste, las muestras MP1, MP2 y MP3, que corresponden a morteros sin nanopartículas o con muy baja concentración, presentan valores de R_4 y R_{26} prácticamente nulos, lo que confirma que el cemento por sí solo no presenta actividad fotocatalítica significativa. La muestra MP1 (control negativo) mostró un valor de R_4 de apenas 0.004 (0.4 %), respaldando esta afirmación.

También se identificó que, aunque el grafeno contribuye positivamente, concentraciones excesivas (como 1 %) pueden inducir efectos contraproducentes. Esto podría deberse a una saturación superficial del mortero o a la formación de aglomerados que interfieren con la acción fotocatalítica del TiO_2 . No obstante, el efecto combinado en las muestras M7, M8 y M9 indica una sinergia efectiva entre TiO_2 y grafeno, siempre que se dosifiquen adecuadamente.

Finalmente, los resultados de la rodamina B son coherentes con los observados en los ensayos de degradación de azul de metileno, reafirmando que las composiciones con mayor concentración de TiO_2 , y en algunos casos combinadas con grafeno, presentan una notable eficiencia fotocatalítica, convirtiéndolas en candidatas prometedoras para aplicaciones autolimpiantes o descontaminantes en materiales de construcción.

B. Verificación de Hipótesis

Hipótesis: ¿La incorporación de nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) y grafeno en la composición del mortero mejorará sus propiedades funcionales al permitir la absorción eficiente de energía solar y su conversión en energía eléctrica o térmica aprovechable, manteniendo su desempeño estructural adecuado para aplicaciones de enlucido?

Los resultados obtenidos permiten confirmar de manera parcial la hipótesis planteada. La adición de nanopartículas de TiO_2 y grafeno mejoró las propiedades funcionales del mortero, lo cual se reflejó en una mayor capacidad de absorción de radiación UV-visible y en una actividad fotocatalítica efectiva, especialmente en la degradación de colorantes. Aunque no fue posible medir con precisión la generación de corriente eléctrica debido a las limitaciones del equipo, se observó una leve respuesta eléctrica al exponer las muestras a luz UV. En cuanto al comportamiento estructural, las mezclas con concentraciones moderadas (entre 0.5% y 2% de TiO_2) conservaron una resistencia a compresión aceptable, por lo que el material continúa siendo apto para su uso como enlucido, siempre que se mantengan proporciones adecuadas de los aditivos.

CAPITULO IV-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A. Conclusiones

La preparación de las mezclas experimentales y patrón se realizó exitosamente mediante una dosificación bien estructurada, con proporciones que cumplieron los estándares descritos anteriormente. La granulometría y densidad del agregado fino, así como la densidad del cemento, se mantuvieron dentro de los parámetros recomendados. Las 27 mezclas experimentales y 9 muestras patrón se formularon con adiciones controladas de TiO_2 y grafeno, lo cual permitió estudiar con precisión su influencia sin afectar de manera crítica la trabajabilidad.

Los ensayos a compresión realizados a los 28 días revelaron que la incorporación de nanopartículas de TiO_2 y grafeno tiende a reducir ligeramente la resistencia del mortero, especialmente en concentraciones elevadas (5%). Sin embargo, ciertas combinaciones, como las muestras M21 (0.5%) y M22 (2%), mostraron comportamientos mecánicos aceptables, lo que indica optimizar las proporciones de los nanomateriales puede mantener la integridad estructural del mortero.

Las pruebas espectrofotométricas UV-Vis confirmaron una mejora en la capacidad de absorción de radiación UV y visible en función de la concentración de nanopartículas. Se observó que la combinación entre TiO_2 y grafeno extiende el rango de absorción, mejorando así el potencial fotocatalítico del sistema, también las curvas de calibración mostraron una correlación lineal adecuada entre la concentración y la absorbancia, validando la respuesta óptica del sistema.

Tanto los ensayos con azul de metileno como con rodamina B evidenciaron la efectividad del mortero dopado en la degradación de colorantes orgánicos. Las muestras M14, M15 (2% TiO_2) (azul de metileno) y M9 (5% TiO_2) (rodamina B) se destacaron por su alto desempeño con esto se confirmó que la acción fotocatalítica ocurre principalmente en las primeras horas de exposición, estabilizándose después.

La medición espectral de las muestras sólidas evidenció un aumento progresivo en la absorbancia con mayor concentración de nanomateriales, confirmando su efecto positivo en la captación de radiación. Por otro lado, si bien no se logró cuantificar la generación

de corriente eléctrica por limitaciones técnicas, se detectó una leve variación al conectar el multímetro bajo luz UV, lo que sugiere una respuesta foto inducida inicial.

Los resultados obtenidos demuestran que la incorporación de TiO_2 y grafeno en morteros de cemento influye de manera significativa en sus propiedades ópticas y fotocatalíticas, con efectos moderados sobre sus propiedades mecánicas. Las formulaciones más equilibradas lograron un desempeño favorable tanto en resistencia como en actividad fotocatalítica, lo que posiciona a este enfoque como una alternativa que puede ser viable para el desarrollo de materiales de construcción multifuncionales. Este estudio representa una investigación semilla, cuyos hallazgos sientan las bases para futuras aplicaciones en soluciones auto limpiantes, descontaminantes y con capacidad de conversión energética.

Recomendaciones

En futuras investigaciones, se recomienda estandarizar el proceso de mezclado con equipos automáticos y explorar otras proporciones agua/cemento para optimizar la resistencia mecánica y la consistencia de la mezcla.

Es recomendable evaluar la resistencia a edades adicionales (90,120 días) para obtener una visión más completa del desempeño mecánico. Asimismo, se sugiere no superar el 2% de TiO_2 para evitar pérdidas de cohesión y trabajabilidad.

Se propone replicar estos ensayos bajo luz solar simulada y en condiciones ambientales reales para verificar el desempeño en campo. Además, sería útil implementar técnicas de caracterización más avanzadas como espectroscopía de fotoluminiscencia para evaluar la recombinación de proporciones.

Para reforzar los hallazgos, se recomienda incorporar otros colorantes modelo y extender el tiempo de exposición. Asimismo, se sugiere investigar la foto degradación de contaminantes gaseosos para aplicaciones en ambientes urbanos.

Es crucial utilizar equipos más sensibles, como medidores de microcorriente o sistemas potencioestáticos, para futuras investigaciones en esta línea. Asimismo, se recomienda implementar celdas electroquímicas bien diseñadas para explorar con mayor detalle el potencial de conversión energética de estos materiales.

MATERIAL DE REFERENCIA

A. Referencias Bibliográficas

- [1] J. Mantilla *et al.*, “Washing effect on the structural and magnetic properties of NiFe₂O₄ nanoparticles synthesized by chemical sol-gel method,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 213, pp. 295–304, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.MATCHEMPHYS.2018.04.022.
- [2] J. A. Rogers, A. A. Maznev, M. J. Banet, and K. A. Nelson, *Optical generation and characterization of acoustic waves in thin films: Fundamentals and applications*, vol. 30. 2000. doi: 10.1146/annurev.matsci.30.1.117.
- [3] J. Zeng *et al.*, “Evaluation of methane emission flux from a typical biogas fermentation ecosystem in China,” *J. Clean. Prod.*, vol. 257, p. 120441, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.120441.
- [4] S. B. Madireddy, V. R. Bodeddula, S. K. Mansani, M. J. M. Wells, and J. O. Boles, “Wipe sampling of amphetamine-type stimulants and recreational drugs on selected household surfaces with analysis by ultra-performance liquid chromatography quadrupole time-of-flight mass spectrometry,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 254–255, no. 1, pp. 46–56, Jun. 2013, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2013.03.012.
- [5] S. Hong, P. Liu, J. Zhang, F. Xing, and B. Dong, “Visual & quantitative identification of cracking in mortar subjected to loads using X-ray computed tomography method,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 100, pp. 15–24, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2019.03.010.
- [6] A. Fujishima and K. Honda, “Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode,” *Nature*, vol. 238, no. 5358, pp. 37–38, 1972, doi: 10.1038/238037A0;KWRD=SCIENCE.
- [7] A. Ali and L. Guo, “Data-driven based investigation of pressure dynamics in underground hydrocarbon reservoirs,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 104–110, May 2021, doi: 10.1016/J.EGYR.2021.02.036.
- [8] F. Wu, Q. Yu, and C. Liu, “Durability of thermal insulating bio-based lightweight concrete:

- Understanding of heat treatment on bio-aggregates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 269, p. 121800, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121800.
- [9] J. Wen, J. Xie, X. Chen, and X. Li, “A review on g-C₃N₄-based photocatalysts,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 391, pp. 72–123, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.APSUSC.2016.07.030.
- [10] F. Tehrani *et al.*, “Laser-Induced Graphene Composites for Printed, Stretchable, and Wearable Electronics,” *Adv. Mater. Technol.*, vol. 4, no. 8, p. 1900162, Aug. 2019, doi: 10.1002/ADMT.201900162;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:2365709X;WGROU: STRING:PUBLICATION.
- [11] F. R. Puga Martínez, “Nanomateriales con propiedades fotocatalíticas mejoradas para tratamientos de purificación de aguas,” 2022, [Online]. Available: <https://idus.us.es/handle/11441/141314>
- [12] M. I. M. Tulio, M. Rosas, D. Roberto, and A. Najarro, “Vocal :,” 2018.
- [13] D. Vizuite, A. & Paredes, “Evaluación de la influencia de nanopartículas de sílice en morteros de cemento portland,” *Rev. Politécnica*, vol. 44 (1), pp, 2019.
- [14] N. Cadmen, J. Bustamante, R. Rivera, F. J. Torres, and J. Ontaneda, “Dopamine Adsorption on Rutile TiO₂(110): Geometry, Thermodynamics, and Core-Level Shifts from First Principles,” *ACS Omega*, vol. 7, no. 5, pp. 4185–4193, Feb. 2022, doi: 10.1021/ACSOMEGA.1C05784.
- [15] “TECNOLOGÍA DEL CONCRETO-NEVILLE | Denilson Ramírez sierra | uDocz.” Accessed: Jun. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.udocz.com/apuntes/66641/tecnologia-del-concreto-neville>
- [16] “Astm C33 C33M 18 | PDF | Concrete | Construction Aggregate.” Accessed: Jun. 16, 2025. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/733423661/ASTM-C33-C33M-18>
- [17] “Standard Test Method for Materials Finer than 75-μm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing - Studocu.” Accessed: Jun. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.studocu.com/en-us/document/rutgers-university/fluid-mechanics/standard-test-method-for-materials-finer-than-75-mm-no-200-sieve-in-mineral-aggregates-by-washing/22105490>

- [18] Q. Zhang, C. S. Dandeneau, X. Zhou, and C. Cao, “ZnO nanostructures for dye-sensitized solar cells,” *Adv. Mater.*, vol. 21, no. 41, pp. 4087–4108, Nov. 2009, doi: 10.1002/ADMA.200803827;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER.
- [19] V. Çelik and E. Mete, “Range-separated hybrid exchange-correlation functional analyses of anatase TiO₂ doped with W, N, S, W/N, or W/S,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 86, no. 20, 2012, doi: 10.1103/PhysRevB.86.205112.
- [20] J. Castillo-Seoane *et al.*, “Multidimensional nanoarchitectures for improved indoor light harvesting in dye-sensitized solar cells,” Dec. 2023, Accessed: Jun. 16, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2312.16663>
- [21] F. Mohammadpour *et al.*, “Enhanced Performance of Dye-Sensitized Solar Cells based on TiO₂ Nanotube Membranes using Optimized Annealing Profile,” *Chem. Commun.*, vol. 51, no. 9, pp. 1631–1634, Oct. 2016, doi: 10.1039/C4CC08266D.
- [22] I. Hwang *et al.*, “Single-walled TiO₂ Nanotubes: Enhanced Carrier-transport Properties by TiCl₄-Treatment,” *Chem. - A Eur. J.*, vol. 21, no. 25, pp. 9204–9208, Oct. 2016, doi: 10.1002/chem.201500730.
- [23] X. Zhang, F. Liu, Q. L. Huang, G. Zhou, and Z. S. Wang, “Dye-sensitized W-doped TiO₂ solar cells with a tunable conduction band and suppressed charge recombination,” *J. Phys. Chem. C*, vol. 115, no. 25, pp. 12665–12671, Jun. 2011, doi: 10.1021/JP201853C.
- [24] K. I. Bolotin *et al.*, “Ultrahigh electron mobility in suspended graphene,” *Solid State Commun.*, vol. 146, no. 9–10, pp. 351–355, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.ssc.2008.02.024.
- [25] T. Jiao *et al.*, “High-efficiency, stable and non-chemically doped graphene–Si solar cells through interface engineering and PMMA antireflection,” *RSC Adv.*, vol. 6, no. 12, pp. 10175–10179, Jan. 2016, doi: 10.1039/C5RA22418G.
- [26] X. Kong *et al.*, “Graphene/Si Schottky solar cells: a review of recent advances and prospects,” *RSC Adv.*, vol. 9, no. 2, p. 863, 2019, doi: 10.1039/C8RA08035F.
- [27] B. Fish, “correlación entre las propiedades físicomecánicas del mortero de cemento portland y el mortero de cal estabilizado con almidón de arroz,” Unoversidad Tecnica de Ambato, 2020. [Online]. Available: chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/ac6b3884-e826-49f6-9a89-1e88f0c4d533/content

- [28] “Specification for Portland Cement,” Jul. 2022, doi: 10.1520/C0150_C0150M-22.
- [29] “Cemento Portland Requisitos Nte Inen 152 | PDF | Cemento | Caliza.” Accessed: Jun. 16, 2025. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/267495229/Cemento-Portland-Requisitos-Nte-Inen-152>
- [30] “Electrochemistry : r/chemhelp.” Accessed: Jun. 16, 2025. [Online]. Available: https://www.reddit.com/r/chemhelp/comments/1cmqn7f/electrochemistry/?utm_source=chatgpt.com
- [31] J. Arun, S. Nachiappan, G. Rangarajan, R. P. Alagappan, K. P. Gopinath, and E. Lichtfouse, “Synthesis and application of titanium dioxide photocatalysis for energy, decontamination and viral disinfection: a review,” *Environ. Chem. Lett.*, vol. 21, no. 1, p. 339, Feb. 2022, doi: 10.1007/S10311-022-01503-Z.
- [32] T. Mao, J. Zha, Y. Hu, Q. Chen, J. Zhang, and X. Luo, “Research Progress of TiO₂ Modification and Photodegradation of Organic Pollutants,” *Inorganics* 2024, Vol. 12, Page 178, vol. 12, no. 7, p. 178, Jun. 2024, doi: 10.3390/INORGANICS12070178.
- [33] Y. qing Zhang, H. Meng, Q. Wu, Y. chen Wei, and Y. qing Zhang, “TiO₂-Based Photocatalytic Building Material for Air Purification in Sustainable and Low-Carbon Cities: A Review,” Aug. 2023, doi: 10.20944/PREPRINTS202308.1381.V1.
- [34] G. S. Kumar, P. Rawat, and A. Goswami, “A review on photocatalytic cementious composites for environment remediation,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2024 225, vol. 22, no. 5, pp. 3983–4006, Jul. 2024, doi: 10.1007/S13762-024-05893-1.
- [35] “Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes,” Jun. 2019, doi: 10.1520/C0511-19.
- [36] “Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50mm] Cube Specimens),” Jul. 2021, doi: 10.1520/C0109_C0109M-21.

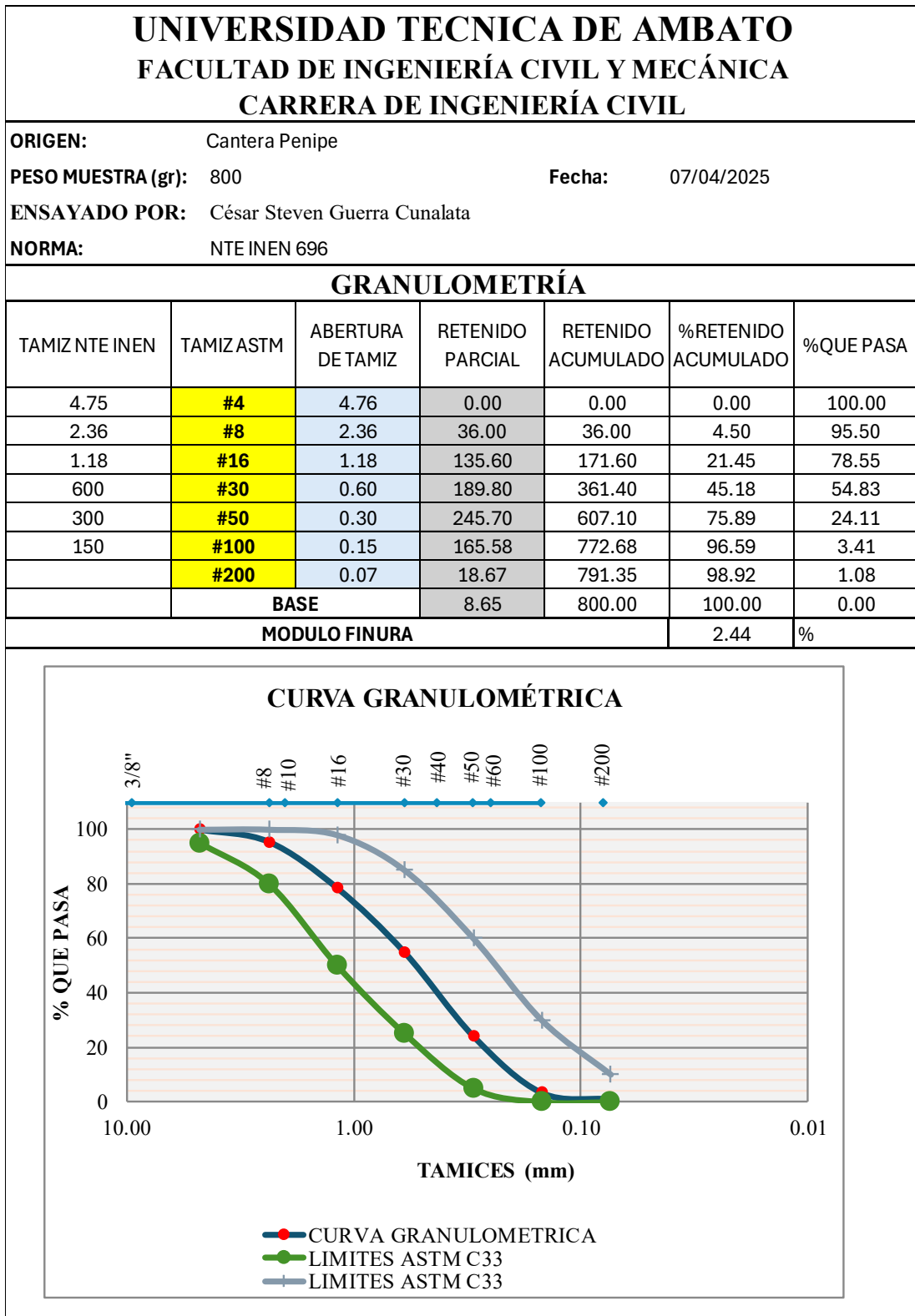
- [37] J. R. Cob-Cantú *et al.*, “TiO₂ nanoparticles immobilized on mortar spheres as a strategy for efficient photocatalyst reuse: new UV reactor design for dye removal,” *Front. Chem.*, vol. 13, p. 1581274, 2025, doi: 10.3389/FCHEM.2025.1581274.
- [38] D. V. Pinjari, K. Prasad, P. R. Gogate, S. T. Mhaske, and A. B. Pandit, “Synthesis of titanium dioxide by ultrasound assisted sol-gel technique: Effect of calcination and sonication time,” *Ultrason. Sonochem.*, vol. 23, pp. 185–191, 2015, doi: 10.1016/J.ULTSONCH.2014.10.017.
- [39] “Fundamentos de la espectrofotometría Índice”.
- [40] “What Is a Calibration Curve in a Spectrophotometer? | HunterLab.” Accessed: Jun. 16, 2025. [Online]. Available: https://www.hunterlab.com/blog/what-is-a-calibration-curve-in-a-spectrophotometer/?utm_source=chatgpt.com
- [41] W. Panich *et al.*, “Evaluation of semi-quantitative colorimetric assays based on loop-mediated isothermal amplification indicators by using image analysis,” *Anal. Biochem.*, vol. 688, May 2024, doi: 10.1016/j.ab.2024.115481.
- [42] S. M. Gupta and M. Tripathi, “A review of TiO₂ nanoparticles,” *Chinese Sci. Bull. 2011 5616*, vol. 56, no. 16, pp. 1639–1657, May 2011, doi: 10.1007/S11434-011-4476-1.
- [43] K. L. Chirinos Peralta, E. J. Aquisé Dueñas, K. L. Chirinos Peralta, and E. J. Aquisé Dueñas, “Mortero fotocatalítico con tiO₂ para la reducción de contaminantes del aire producidas por emanaciones vehiculares,” *Rev. Ing. construcción*, vol. 37, no. 1, pp. 26–34, 2022, doi: 10.7764/RIC.00014.21.
- [44] S. V. Samchenko, I. V. Kozlova, A. V. Korshunov, O. V. Zemskova, and M. O. Dudareva, “Synthesis and Evaluation of Properties of an Additive Based on Bismuth Titanates for Cement Systems,” *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 18, 2023, doi: 10.3390/ma16186262.
- [45] A. Salazar, “Un método empírico para el proporcionamiento de mezclas de Morteros de Cemento Portland para Albañilería,” *Mater. Construcción*, vol. 35, no. 197, pp. 43–57, Mar. 1985, doi: 10.3989/MC.1985.V35.I197.932.
- [46] “NTE INEN 872 (2011) Aridos Hormigon Requisitos | PDF | Agregado de construcción | Hormigón.” Accessed: Jun. 16, 2025. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/515214336/NTE-INEN-872-2011-Aridos-Hormigon>

Requisitos

- [47] “Traduccion Norma ASTM C-109-16 | PDF | Cemento | Hormigón.” Accessed: Jun. 16, 2025. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/477848885/Traduccion-Norma-ASTM-C-109-16>
- [48] G. Wang, W. Guo, D. Xu, D. Liu, and M. Qin, “Graphene Oxide Hybridised TiO₂ for Visible Light Photocatalytic Degradation of Phenol,” *Symmetry* 2020, Vol. 12, Page 1420, vol. 12, no. 9, p. 1420, Aug. 2020, doi: 10.3390/SYM12091420.
- [49] “I. H. Lambert ... Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae : Lambert, Johann Heinrich : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive.” Accessed: Jun. 16, 2025. [Online]. Available: https://archive.org/details/TO0E039861_TO0324_PNI-2733_000000
- [50] G. Rocha-Ortiz *et al.*, “UV and Visible light photodegradation of methylene blue with graphene decorated titanium dioxide,” *Mater. Res. Express*, vol. 7, no. 3, p. 035504, Mar. 2020, doi: 10.1088/2053-1591/AB7AC5.
- [51] M. Xing, B. Qiu, X. Li, and J. Zhang, “TiO₂/Graphene Composites with Excellent Performance in Photocatalysis,” pp. 23–67, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-26079-2_2.
- [52] B. Wang *et al.*, “Tortuous Pore Path Through the Glaucomatous Lamina Cribrosa,” *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, Dec. 2018, doi: 10.1038/S41598-018-25645-9.
- [53] “UNI 11247:2010 - UNI Ente Italiano di Normazione.” Accessed: Jun. 16, 2025. [Online]. Available: <https://store.uni.com/uni-11247-2010>

B. Anexos

Anexo 1 Granulometría





Anexo 2 Densidad del cemento

UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
ORIGEN:		Cantera Penipe		
PESO MUESTRA (gr):		130	Fecha: 24/03/2025	
ENSAYADO POR:		César Steven Guerra Cunalata		
NORMA:		ASTM C188		
DENSIDAD DEL CEMENTO				
DATOS	DESIGNACION	UNIDAD	VALOR	
Ma	Masa del fraco + gasolina	gr	321	321
V1	Lectura inicial de la gasolina	cm3	0.6	0.6
Mp	Masa del frasco + gasolina + cemento	gr	387	385.9
V2	Lectura Final de la gasolina	cm3	22.4	22.2
V3= V2-V1	Volumen Desalojado de gasolina	cm3	21.8	21.6
Mc= Mp-Ma	Masa del cemento usado	gr	66	64.9
DRC = Mc/V3	Densidad del cemento	gr/cm3	3.03	3.00
	Densidad real promedio	gr/cm3	3.02	



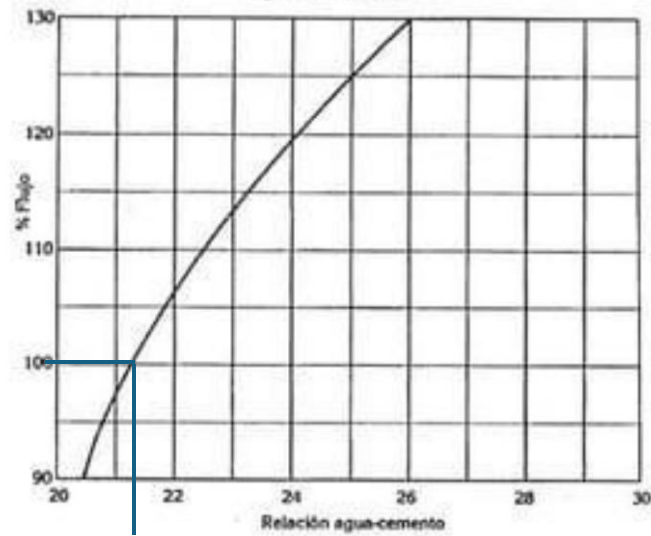
Anexo 3 Densidad del agregado fino

UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
ORIGEN:	Cantera Penipe	Fecha:	07/04/2025
PESO MUESTRA (gr):	500		
ENSAYADO POR:	César Steven Guerra Cunalata		
NORMA:	ASTM C128		
DENSIDAD DE AGREGADO FINO			
DATOS	DESIGNACION	UNIDAD	VALOR
M1	Masa del picnometro	gr	144.5
M2	Masa del picnometro + muestra SSS	gr	644.5
M3	Masa de picnometro + muestra SSS + agua	gr	939.87
M4= M3-M2	Masa agua añadida	gr	295.37
M5	Masa picnometro + 500cc de agua	gr	644.5
M6=M5-M1	Masa de 500 cc de agua	gr	500
DA=M6/500cm3	Densidad del agua	gr/cm3	1.00
M7=M6- M4	Masa del agua desalojada por la muestra	gr	204.63
Msss= M2-M1	Masa del agregado	gr	500
Vsss=M7/DA	Volumen del agua desalojada	cm3	204.63
DRA= Msss/Vsss	Densidad real de la arena	gr/cm3	2.44

Anexo 4 Dosificación del mortero

4 RELACION AGUA CEMENTO DE ACUERDO A LA FLUIDEZ

Figura 14.3 Relación entre % fluidez y relación agua-cemento



5 OBTENCION DEL VALOR DE b

Tabla 14.8 Valores de b para distintas consistencias y módulos de finura de la arena (14.2)

Consistencia	Módulo de Finura	Arena de granos redondos y lisos	Arena de granos angulares y rugosos
Seca (90 %)	1.7	0.3293	0.3215
	2.2	0.3110	0.3028
	2.7	0.2772	0.2930
	3.2	0.2394	0.2494
Plástica (110 %)	1.7	0.3242	0.3238
	2.2	0.3033	0.2947
	2.7	0.2734	0.2879
	3.2	0.2368	0.2477
Fluida (130 %)	1.7	0.3172	0.3216
	2.2	0.2927	0.3003
	2.7	0.2687	0.2949
	3.2	0.2340	0.2629

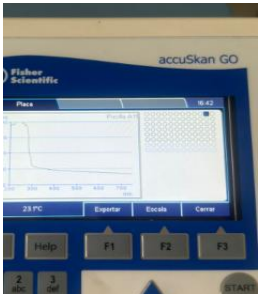
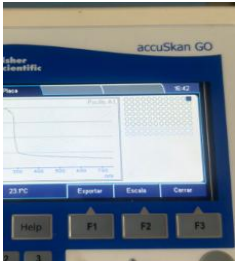
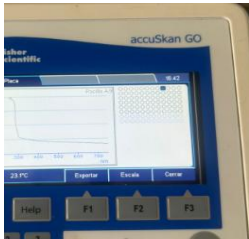
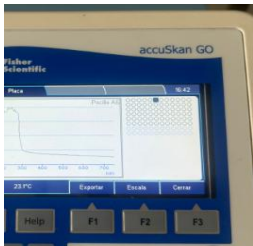
Valor mayor	Valor menor	Valor que necesito
2.7	0.2734	2.56
2.2	0.3033	
0.5	0.0299	
0.14	0.0598	
b	0.2818	

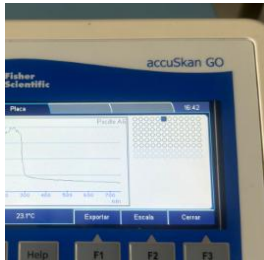
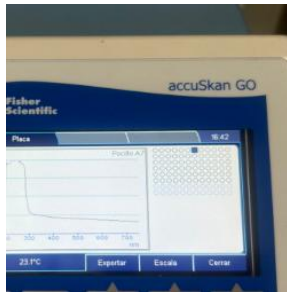
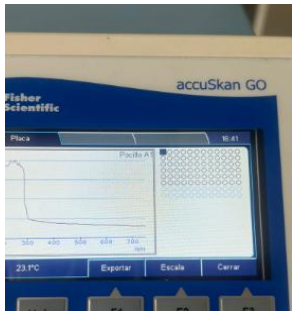
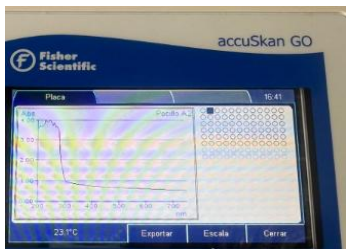
6	Determinacion de la proporcion 1:N	
	Una vez conocidos los valores de A/C , K y b , la única incógnita que hay en la ecuación presentada, es el valor de n . Despejando la ecuación queda:	
	$n = \frac{\ln(A/C) - \ln(K)}{b} \quad (14.2)$	
	n	4.000
5	Calculo de Contenido de cemento	
	El contenido de cemento, aplicando la ecuación (14.9) será:	
	$C = \frac{1.000}{\frac{1}{3,03} + \frac{3.35}{2,56} + 0,72} = 424 \text{ kg/cm}^3$	
	c	373 kg/m3
6	Contenido de Agua	
	A	264.88 lt/m3
7	Contenido de Arena	
	a	1492 kg/m3

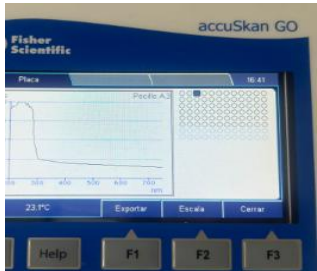
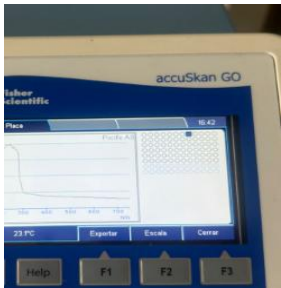
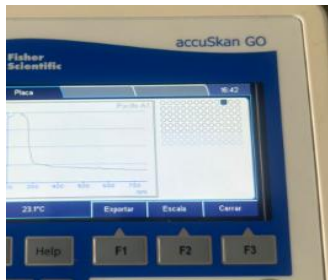
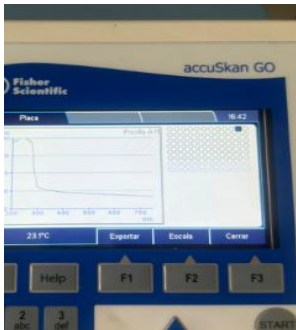
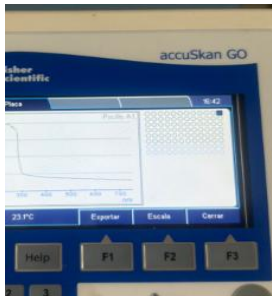
DOSIFICACIÓN PARA 1 M3				
	PESO Kg	Peso Especifico	Volumen Ltr	m3
CEMENTO	373	3.02	124	0.1
ARENA	1492	2.44	612	0.6
AGUA	264.88	1	265	0.3
			1000	1
DOSIFICACIÓN PARA 125 CM3				
	PESO Kg	Peso en gramos	Peso Especifico	Volumen Ltr
CEMENTO	0.04663	46.63	3.02	0.015
ARENA	0.18653	186.53	2.44	0.076
AGUA	0.03311	33.11	1	0.033
				0.125

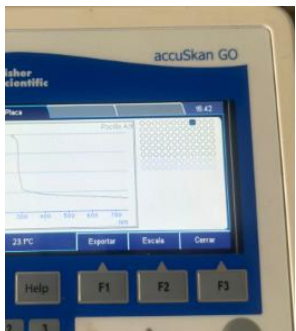
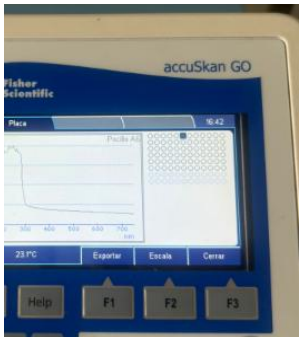
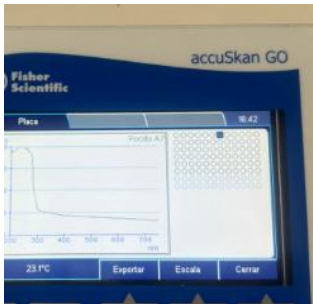
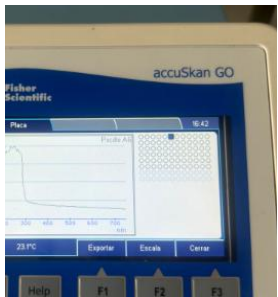
DENOMINACION	DOSIFICACIÓN							FECHA DE ELABORACION
	CEMENTO (g)	ARENA (g)	AGUA (g)	TiO ₂ (%)	Grafeno (%)	DIOXIDO DE TITANIO (g)	GRAFENO (g)	
M1	46.63	186.53	33.11	0.50	0.05	0.23	0.02	09/04/2025
M2	46.63	186.53	33.11	0.50	0.50	0.23	0.23	09/04/2025
M3	46.63	186.53	33.11	0.50	1.00	0.23	0.47	09/04/2025
M4	46.63	186.53	33.11	2.00	0.05	0.93	0.02	09/04/2025
M5	46.63	186.53	33.11	2.00	0.50	0.93	0.23	09/04/2025
M6	46.63	186.53	33.11	2.00	1.00	0.93	0.47	09/04/2025
M7	46.63	186.53	33.11	5.00	0.05	2.33	0.02	09/04/2025
M8	46.63	186.53	33.11	5.00	0.50	2.33	0.23	09/04/2025
M9	46.63	186.53	33.11	5.00	1.00	2.33	0.47	09/04/2025
M10	46.63	186.53	33.11	0.50	0.05	0.23	0.02	10/04/2025
M11	46.63	186.53	33.11	0.50	0.50	0.23	0.23	10/04/2025
M12	46.63	186.53	33.11	0.50	1.00	0.23	0.47	10/04/2025
M13	46.63	186.53	33.11	2.00	0.05	0.93	0.02	10/04/2025
M14	46.63	186.53	33.11	2.00	0.50	0.93	0.23	10/04/2025
M15	46.63	186.53	33.11	2.00	1.00	0.93	0.47	10/04/2025
M16	46.63	186.53	33.11	5.00	0.05	2.33	0.02	10/04/2025
M17	46.63	186.53	33.11	5.00	0.50	2.33	0.23	10/04/2025
M18	46.63	186.53	33.11	5.00	1.00	2.33	0.47	10/04/2025
M19	46.63	186.53	33.11	0.50	0.05	0.23	0.02	11/04/2025
M20	46.63	186.53	33.11	0.50	0.50	0.23	0.23	11/04/2025
M21	46.63	186.53	33.11	0.50	1.00	0.23	0.47	11/04/2025
M22	46.63	186.53	33.11	2.00	0.05	0.93	0.02	11/04/2025
M23	46.63	186.53	33.11	2.00	0.50	0.93	0.23	11/04/2025
M24	46.63	186.53	33.11	2.00	1.00	0.93	0.47	11/04/2025
M25	46.63	186.53	33.11	5.00	0.05	2.33	0.02	11/04/2025
M26	46.63	186.53	33.11	5.00	0.50	2.33	0.23	11/04/2025
M27	46.63	186.53	33.11	5.00	1.00	2.33	0.47	11/04/2025
MP1	46.63	186.53	33.11					09/04/2025
MP2	46.63	186.53	33.11					09/04/2025
MP3	46.63	186.53	33.11					09/04/2025
MP4	46.63	186.53	33.11					10/04/2025
MP5	46.63	186.53	33.11					10/04/2025
MP6	46.63	186.53	33.11					10/04/2025
MP7	46.63	186.53	33.11					11/04/2025
MP8	46.63	186.53	33.11					11/04/2025
MP9	46.63	186.53	33.11					11/04/2025

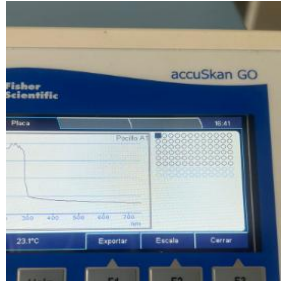
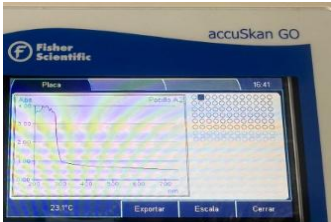
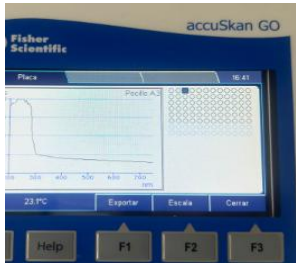
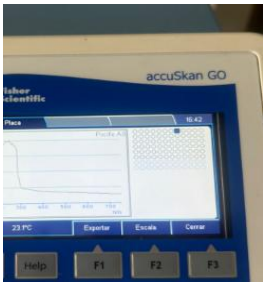
Anexo 5 Espectrofotometría

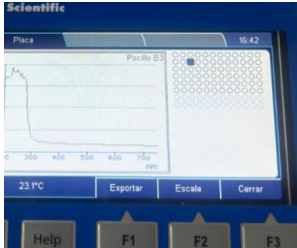
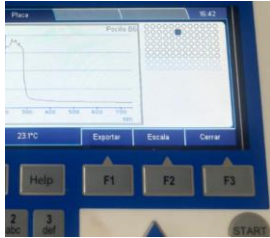
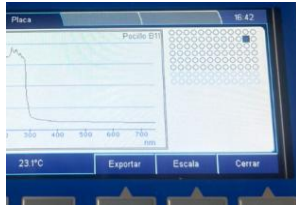
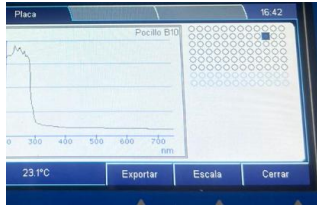
UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL		
ORIGEN:		UODIDE LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN
ENSAYADO POR:		César Steven Guerra Cunalata
FECHA:		05/05/2025
ESPECTROFOMETRIA		
nm	B Promedio Absorbancia	Muestras
200	0.4710	 MB1
202	0.5691	
204	0.6670	
206	0.7652	
208	0.8632	
210	0.8788	
212	0.8940	
214	0.9070	
216	0.9225	
218	0.9481	
220	0.9918	 MB2
222	1.0436	
224	1.0829	
226	1.1128	
228	1.1365	
230	1.1529	
232	1.1681	
234	1.1882	
236	1.1947	
238	1.1875	
240	1.1754	 MB3
242	1.1621	
244	1.1520	
246	1.1392	
248	1.1219	
250	1.1058	
252	1.0900	
254	1.0711	
256	1.0354	
258	0.9947	
260	0.9663	 MB4
262	0.9453	
264	0.9327	
266	0.9182	
268	0.8942	
270	0.8540	
272	0.7906	
274	0.7407	
276	0.6931	
278	0.6464	
280	0.5985	
282	0.5483	
284	0.5076	
286	0.4716	

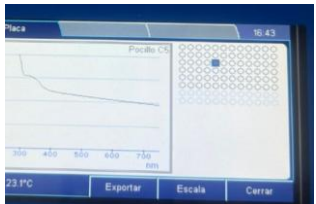
288	0.4408		MB5
290	0.4404		
292	0.4399		
294	0.4395		
296	0.4390		
298	0.4386		
300	0.4382		
302	0.4377		
304	0.4373		
306	0.4369		
308	0.4364		MB6
310	0.4360		
312	0.4355		
314	0.4351		
316	0.4347		
318	0.4342		
320	0.4338		
322	0.4334		
324	0.4329		
326	0.4325		
328	0.4321		MB7
330	0.4316		
332	0.4312		
334	0.4308		
336	0.4304		
338	0.4299		
340	0.4295		
342	0.4291		
344	0.4286		
346	0.4282		
348	0.4278		MB8
350	0.4274		
352	0.4269		
354	0.4265		
356	0.4261		
358	0.4256		
360	0.4252		
362	0.4248		
364	0.4244		
366	0.4240		
368	0.4235		MB9
370	0.4231		
372	0.4227		
374	0.4223		
376	0.4218		
378	0.4214		
380	0.4210		
382	0.4206		
384	0.4202		
386	0.4197		
388	0.4193		
390	0.4189		
392	0.4185		
394	0.4181		
396	0.4176		

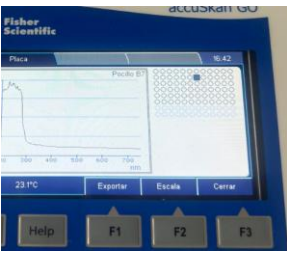
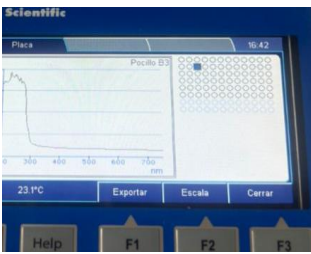
398	0.4172		MB10
400	0.4168		
402	0.4164		
404	0.4160		
406	0.4156		
408	0.4151		
410	0.4147		
412	0.4143		
414	0.4139		
416	0.4135		
418	0.4131		MB11
420	0.4127		
422	0.4122		
424	0.4118		
426	0.4114		
428	0.4110		
430	0.4106		
432	0.4102		
434	0.4098		
436	0.4094		
438	0.4090		MB12
440	0.4086		
442	0.4082		
444	0.4077		
446	0.4073		
448	0.4069		
450	0.4065		
452	0.4061		
454	0.4057		
456	0.4053		
458	0.4049		MB1
460	0.4045		
462	0.4041		
464	0.4037		
466	0.4033		
468	0.4029		
470	0.4025		
472	0.4021		
474	0.4017		
476	0.4013		
478	0.4009		MB2
480	0.4005		
482	0.4001		
484	0.3997		
486	0.3993		
488	0.3989		
490	0.3985		
492	0.3981		
494	0.3977		
496	0.3973		
498	0.3969		
500	0.3965		
502	0.3961		
504	0.3957		
506	0.3953		

508	0.3949		MB3
510	0.3945		
512	0.3941		
514	0.3937		
516	0.3933		
518	0.3929		
520	0.3925		
522	0.3922		
524	0.3918		
526	0.3914		
528	0.3910		MB4
530	0.3906		
532	0.3902		
534	0.3898		
536	0.3894		
538	0.3890		
540	0.3886		
542	0.3883		
544	0.3879		
546	0.3875		
548	0.3871		MB5
550	0.3867		
552	0.3863		
554	0.3859		
556	0.3855		
558	0.3852		
560	0.3848		
562	0.3844		
564	0.3840		
566	0.3836		
568	0.3832		MB6
570	0.3829		
572	0.3825		
574	0.3821		
576	0.3817		
578	0.3813		
580	0.3810		
582	0.3806		
584	0.3802		
586	0.3798		
588	0.3794		
590	0.3791		
592	0.3787		
594	0.3783		

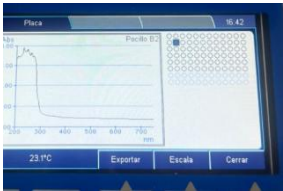
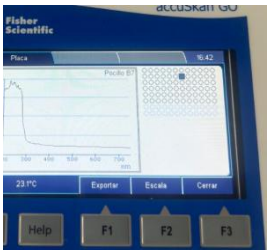
596	0.3779		MB7
598	0.3775		
600	0.3772		
602	0.3768		
604	0.3764		
606	0.3760		
608	0.3757		
610	0.3753		
612	0.3749		
614	0.3745		
616	0.3742		MB8
618	0.3738		
620	0.3734		
622	0.3730		
624	0.3727		
626	0.3723		
628	0.3719		
630	0.3715		
632	0.3712		
634	0.3708		
636	0.3704		MB9
638	0.3701		
640	0.3697		
642	0.3693		
644	0.3690		
646	0.3686		
648	0.3682		
650	0.3679		
652	0.3675		
654	0.3671		
656	0.3668		MB10
658	0.3664		
660	0.3660		
662	0.3657		
664	0.3653		
666	0.3649		
668	0.3646		
670	0.3642		
672	0.3638		
674	0.3635		
676	0.3631		MB11
678	0.3627		
680	0.3624		
682	0.3620		
684	0.3617		
686	0.3613		
688	0.3609		
690	0.3606		
692	0.3602		
694	0.3599		
696	0.3595		
698	0.3591		
700	0.3588		
702	0.3584		
704	0.3581		

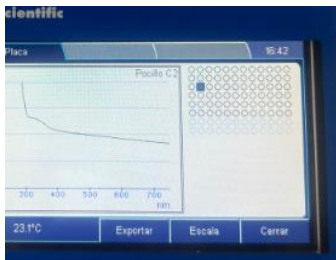
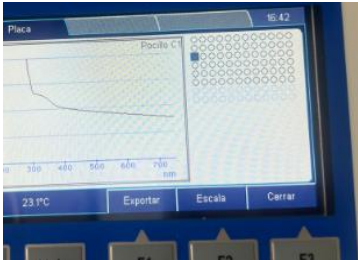
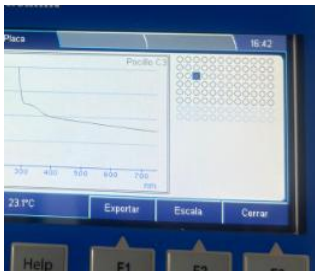
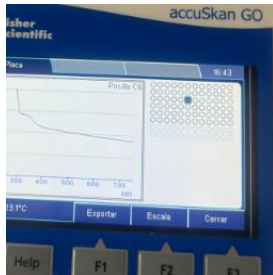
UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL		
: UODIDE LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN ADO POR: César Steven Guerra Cunalata FECHA: 05/05/2025		
ESPECTROFOMETRIA		
λ	A Promedio Absorbancia	Muestras
200	0.4557	
202	0.5754	
204	0.7879	
206	1.0139	
208	1.1453	
210	1.2832	
212	1.4275	
214	1.5806	
216	1.7459	
218	1.8307	
220	1.9126	
222	1.9885	
224	2.0594	
226	2.1230	
228	2.1809	
230	2.2302	
232	2.2698	
234	2.3038	
236	2.3359	
238	2.3655	
240	2.3936	
242	2.4189	
244	2.4485	
246	2.4714	
248	2.4836	
250	2.4874	
252	2.4908	
254	2.4976	
256	2.4976	
258	2.4803	
260	2.4649	
262	2.4541	
264	2.4491	
266	2.4426	
268	2.4210	
270	2.3994	
272	2.3836	
274	2.3465	
276	2.2667	
278	2.1488	
280	1.9924	
282	1.8187	
284	1.6391	
286	1.4612	

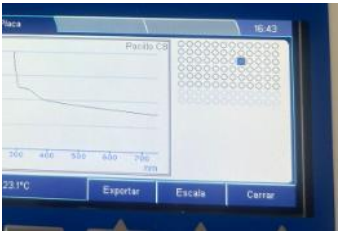
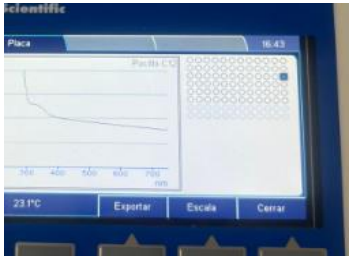
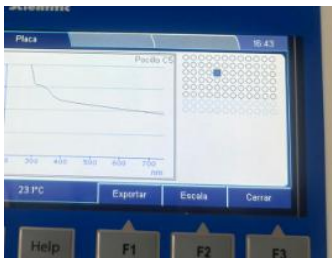
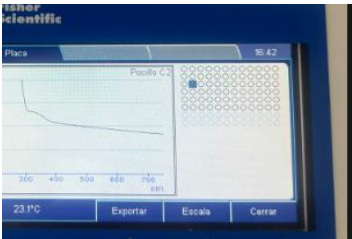
288	1.2849		MA5
290	1.1347		
292	1.0125		
294	0.9215		
296	0.8521		
298	0.7908		
300	0.7305		
302	0.6905		
304	0.6667		
306	0.6518		
308	0.6418		MA6
310	0.6347		
312	0.6292		
314	0.6249		
316	0.6213		
318	0.6180		
320	0.6148		
322	0.6116		
324	0.6085		
326	0.6055		
328	0.6025		MA7
330	0.5998		
332	0.5972		
334	0.5946		
336	0.5920		
338	0.5894		
340	0.5870		
342	0.5846		
344	0.5823		
346	0.5801		
348	0.5779		MA8
350	0.5757		
352	0.5734		
354	0.5709		
356	0.5683		
358	0.5656		
360	0.5627		
362	0.5598		
364	0.5568		
366	0.5539		
368	0.5511		MA9
370	0.5484		
372	0.5459		
374	0.5434		
376	0.5410		
378	0.5387		
380	0.5365		
382	0.5343		
384	0.5321		
386	0.5301		
388	0.5282		
390	0.5265		
392	0.5250		
394	0.5236		
396	0.5224		

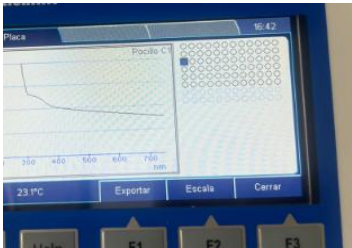
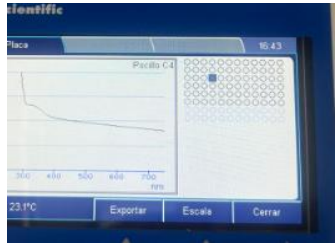
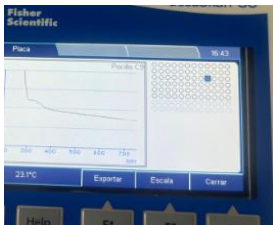
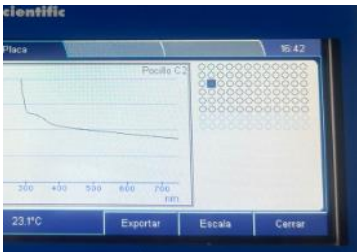
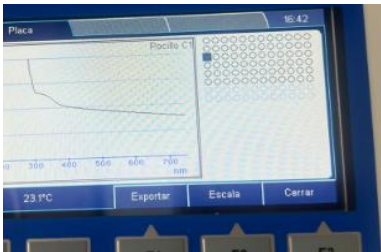
398	0.5213		MA10
400	0.5203		
402	0.5193		
404	0.5183		
406	0.5174		
408	0.5164		
410	0.5154		
412	0.5145		
414	0.5136		
416	0.5127		
418	0.5119		MA11
420	0.5111		
422	0.5103		
424	0.5096		
426	0.5088		
428	0.5080		
430	0.5072		
432	0.5063		
434	0.5054		
436	0.5045		
438	0.5036		MA12
440	0.5028		
442	0.5020		
444	0.5013		
446	0.5006		
448	0.4999		
450	0.4992		
452	0.4985		
454	0.4978		
456	0.4971		
458	0.4964		MA1
460	0.4956		
462	0.4949		
464	0.4942		
466	0.4934		
468	0.4927		
470	0.4920		
472	0.4913		
474	0.4906		
476	0.4899		
478	0.4891		MA2
480	0.4883		
482	0.4875		
484	0.4867		
486	0.4859		
488	0.4851		
490	0.4844		
492	0.4836		
494	0.4829		
496	0.4822		
498	0.4815		
500	0.4808		
502	0.4800		
504	0.4793		
506	0.4785		

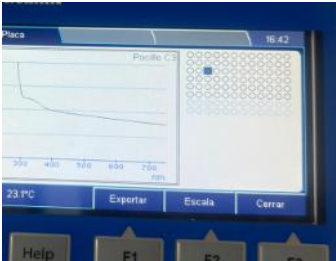
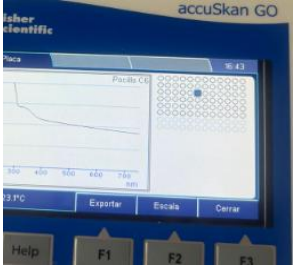
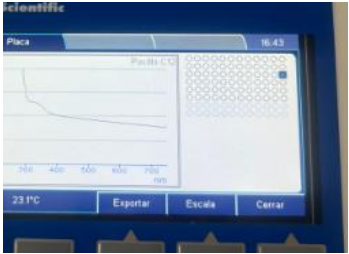
508	0.4777		MA3
510	0.4770		
512	0.4762		
514	0.4755		
516	0.4748		
518	0.4741		
520	0.4734		
522	0.4727		
524	0.4720		
526	0.4713		
528	0.4705		MA4
530	0.4697		
532	0.4689		
534	0.4682		
536	0.4674		
538	0.4666		
540	0.4659		
542	0.4652		
544	0.4645		
546	0.4637		
548	0.4630		MA5
550	0.4623		
552	0.4616		
554	0.4608		
556	0.4600		
558	0.4593		
560	0.4585		
562	0.4578		
564	0.4571		
566	0.4564		
568	0.4556		MA6
570	0.4549		
572	0.4542		
574	0.4534		
576	0.4527		
578	0.4519		
580	0.4511		
582	0.4503		
584	0.4496		
586	0.4489		
588	0.4482		MA7
590	0.4474		
592	0.4467		
594	0.4460		
596	0.4452		
598	0.4445		
600	0.4437		
602	0.4429		
604	0.4422		
606	0.4414		
608	0.4407		
610	0.4400		
612	0.4393		
614	0.4385		
616	0.4378		

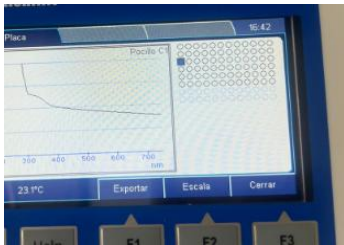
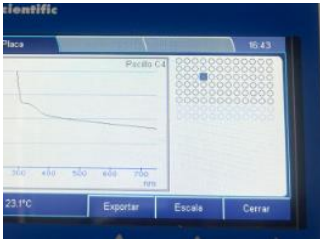
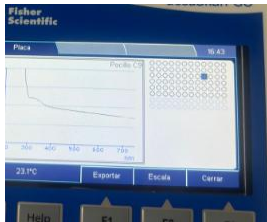
618	0.4371		MA8
620	0.4363		
622	0.4355		
624	0.4347		
626	0.4340		
628	0.4332		
630	0.4325		
632	0.4317		
634	0.4310		
636	0.4303		
638	0.4296		MA9
640	0.4288		
642	0.4281		
644	0.4274		
646	0.4266		
648	0.4258		
650	0.4250		
652	0.4243		
654	0.4235		
656	0.4227		
658	0.4219		MA10
660	0.4211		
662	0.4204		
664	0.4196		
666	0.4187		
668	0.4179		
670	0.4171		
672	0.4162		
674	0.4154		
676	0.4146		
678	0.4139		MA11
680	0.4131		
682	0.4124		
684	0.4117		
686	0.4110		
688	0.4102		
690	0.4095		
692	0.4087		
694	0.4080		
696	0.4072		
698	0.4065		MA12
700	0.4058		
702	0.4052		
704	0.4046		
706	0.4040		
708	0.4034		
710	0.4028		
712	0.4022		
714	0.4015		
716	0.4008		
718	0.4001		
720	0.3994		
722	0.3987		
724	0.3981		
726	0.3975		

UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
ORIGEN:		UODIDE LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN	
ENSAYADO POR:		César Steven Guerra Cunalata	
FECHA:		05/05/2025	
ESPECTROFOMETRIA			
Muestra	C Promedio Absorbancia	Muestras	
200	0.8352		MC1
202	0.8468		
204	0.8602		
206	0.8755		
208	0.8928		
210	0.9122		
212	0.9339		
214	0.9580		
216	0.9845		
218	1.0134		
220	1.0448		MC2
222	1.0787		
224	1.1150		
226	1.1536		
228	1.1943		
230	1.2371		
232	1.2817		
234	1.3277		
236	1.3750		
238	1.4230		
240	1.4716		MC3
242	1.5201		
244	1.5681		
246	1.6152		
248	1.6608		
250	1.7045		
252	1.7457		
254	1.7840		
256	1.8188		
258	1.8497		
260	1.8763		MC4
262	1.8983		
264	1.9152		
266	1.9270		
268	1.9333		
270	1.9342		
272	1.9295		
274	1.9192		
276	1.9036		
278	1.8828		
280	1.8570		
282	1.8265		
284	1.7917		
286	1.6570		

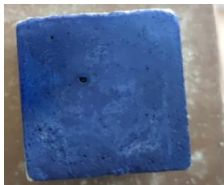
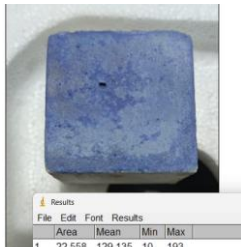
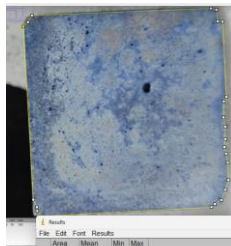
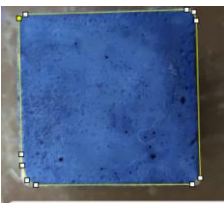
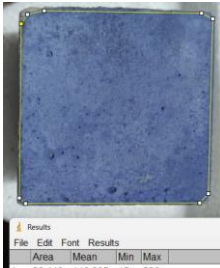
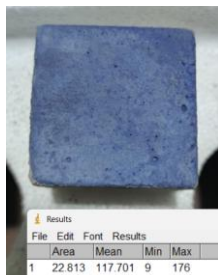
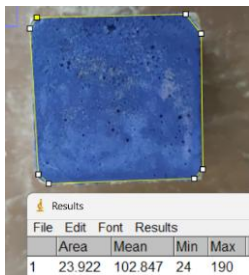
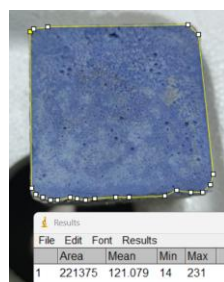
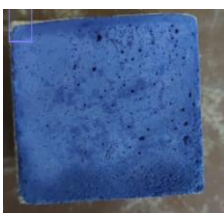
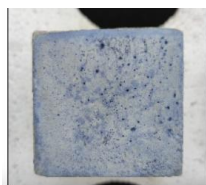
288	1.5043		MC5
290	1.4096		
292	1.3494		
294	1.1926		
296	1.0553		
298	0.9571		
300	0.8793		
302	0.8136		
304	0.7541		
306	0.6983		
308	0.6467		MC6
310	0.5983		
312	0.5528		
314	0.5092		
316	0.4679		
318	0.4282		
320	0.3907		
322	0.3551		
324	0.3222		
326	0.2907		
328	0.2619		MC7
330	0.2350		
332	0.2091		
334	0.1855		
336	0.1644		
338	0.1453		
340	0.1273		
342	0.1110		
344	0.0958		
346	0.0851		
348	0.0752		MC8
350	0.0664		
352	0.0645		
354	0.0622		
356	0.0599		
358	0.0573		
360	0.0558		
362	0.0546		
364	0.0534		
366	0.0522		
368	0.0512		MC9
370	0.0503		
372	0.0495		
374	0.0489		
376	0.0483		
378	0.0478		
380	0.0472		
382	0.0472		
384	0.0472		
386	0.0472		
388	0.0472		
390	0.0472		
392	0.0471		
394	0.0471		
396	0.0471		

398	0.0471		MC10
400	0.0471		
402	0.0471		
404	0.0471		
406	0.0471		
408	0.0470		
410	0.0470		
412	0.0470		
414	0.0470		
416	0.0470		
418	0.0470		MC11
420	0.0470		
422	0.0470		
424	0.0470		
426	0.0469		
428	0.0469		
430	0.0469		
432	0.0469		
434	0.0469		
436	0.0469		
438	0.0469		MC12
440	0.0469		
442	0.0469		
444	0.0468		
446	0.0468		
448	0.0468		
450	0.0468		
452	0.0468		
454	0.0468		
456	0.0468		
458	0.0468		MC1
460	0.0468		
462	0.0467		
464	0.0467		
466	0.0467		
468	0.0467		
470	0.0467		
472	0.0467		
474	0.0467		
476	0.0467		
478	0.0467		MC2
480	0.0466		
482	0.0466		
484	0.0466		
486	0.0466		
488	0.0466		
490	0.0466		
492	0.0466		
494	0.0466		
496	0.0466		
498	0.0465		
500	0.0465		
502	0.0465		
504	0.0465		
506	0.0465		

508	0.0465		MC3
510	0.0465		
512	0.0465		
514	0.0465		
516	0.0465		
518	0.0464		
520	0.0464		
522	0.0464		
524	0.0464		
526	0.0464		
528	0.0464		MC4
530	0.0464		
532	0.0464		
534	0.0464		
536	0.0463		
538	0.0463		
540	0.0463		
542	0.0463		
544	0.0463		
546	0.0463		
548	0.0463		MC5
550	0.0463		
552	0.0463		
554	0.0462		
556	0.0462		
558	0.0462		
560	0.0462		
562	0.0462		
564	0.0462		
566	0.0462		
568	0.0462		MC6
570	0.0462		
572	0.0462		
574	0.0461		
576	0.0461		
578	0.0461		
580	0.0461		
582	0.0461		
584	0.0461		
586	0.0461		
588	0.0461		MC7
590	0.0461		
592	0.0461		
594	0.0460		
596	0.0460		
598	0.0460		
600	0.0460		
602	0.0460		
604	0.0460		
606	0.0460		
608	0.0460		
610	0.0460		
612	0.0459		
614	0.0459		
616	0.0459		

618	0.0459		MC8
620	0.0459		
622	0.0459		
624	0.0459		
626	0.0459		
628	0.0459		
630	0.0459		
632	0.0458		
634	0.0458		
636	0.0458		
638	0.0458		MC9
640	0.0458		
642	0.0458		
644	0.0458		
646	0.0458		
648	0.0458		
650	0.0458		
652	0.0457		
654	0.0457		
656	0.0457		
658	0.0457		MC10
660	0.0457		
662	0.0457		
664	0.0457		
666	0.0457		
668	0.0457		
670	0.0457		
672	0.0456		
674	0.0456		
676	0.0456		
678	0.0456		MC11
680	0.0456		
682	0.0456		
684	0.0456		
686	0.0456		
688	0.0456		
690	0.0456		
692	0.0455		
694	0.0455		
696	0.0455		
698	0.0455		MC12
700	0.0455		
702	0.0455		
704	0.0455		
706	0.0455		
708	0.0455		
710	0.0455		
712	0.0454		
714	0.0454		
716	0.0454		
718	0.0454		
720	0.0454		
722	0.0454		
724	0.0454		
726	0.0454		

Anexo 6 Degradación de colorantes

UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO																
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA																
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL																
ORIGEN: AMBATO-ECUADOR																
ENSAYADO POR: César Steven Guerra Cunalata																
FECHA: 10/05/2025																
DEGRADACION DE COLORANTES																
MUESTRAS	DIA 0				DIA 7				DIA 14				DIA 28			
	Area	Mean	Min	Max	Area	Mean	Min	Max	Area	Mean	Min	Max	Area	Mean	Min	Max
M10	 Results File Edit Font Results Area Mean Min Max 24.905 91.132 8 237				 Results File Edit Font Results Area Mean Min Max 1 22.857 130.309 2 208				 Results File Edit Font Results Area Mean Min Max 1 22.558 129.135 10 193				 Results File Edit Font Results Area Mean Min Max 1 21.156 140.450 9 190			
	24.9	91.1	8.0	237.0	22.9	130.3	2.0	208.0	22.6	129.1	10.0	193.0	21.2	140.5	0.0	190.0
M11	 Results File Edit Font Results Area Mean Min Max 1 23.898 99.122 12 234				 Results File Edit Font Results Area Mean Min Max 1 23.448 118.835 15 223				 Results File Edit Font Results Area Mean Min Max 1 22.813 117.701 9 176				 Results File Edit Font Results Area Mean Min Max 1 21.063 138.477 5 179			
	23.9	99.1	12.0	234.0	23.4	118.8	15.0	223.0	22.8	117.7	9.0	176.0	21.1	138.5	5.0	179.0
M12	 Results File Edit Font Results Area Mean Min Max 1 23.922 102.847 24 190				 Results File Edit Font Results Area Mean Min Max 1 23.272 120.544 12 240				 Results File Edit Font Results Area Mean Min Max 1 22.1375 121.079 14 231				 Results File Edit Font Results Area Mean Min Max 21.221 140.061 14 188			
	23.9	102.8	24.0	190.0	23.3	120.5	12.0	240.0	22.1	121.1	14.0	231.0	21.2	140.1	14.0	188.0
M13	 Results File Edit Font Results Area Mean Min Max 1 24.838 102.660 11 200				 Results File Edit Font Results Area Mean Min Max 1 23.027 133.818 10 209				 Results File Edit Font Results Area Mean Min Max 1 22.556 131.411 14 195				 Results File Edit Font Results Area Mean Min Max 21.390 152.183 6 192			
	24.8	102.7	11.0	200.0	23.0	133.8	10.0	209.0	22.6	147.2	14.0	195.0	21.4	152.2	6.0	192.0

Anexo 7 Curva de Calibración

UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
ORIGEN: UODIDE LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN ENSAYADO POR: César Steven Guerra Cunalata FECHA: 14/05/2025				
CURVA DE CALIBRACION				
Solucion Estandar		material ensayado	Absorbancias	
0	0	COMBINADO	0	
B	0.2	COMBINADO	1.19472	
A	0.4	COMBINADO	2.01	
C	0.8	COMBINADO	2.499	
X	Y	X2	Y2	XY
0	0	0	0	0
0.19417476	1.19472	0.03770384	1.42735588	0.23198447
0.38834951	2.01	0.15081535	4.0401	0.78058252
0.80906149	2.499	0.65458049	6.245001	2.02184466

SUMAS	
X	1.39
Y	5.70
X2	0.84
Y2	11.71
XY	3.03

COEFICIENTES	
Sxx	0.35897194
Syy	3.57935142
Sxy	1.05010777
VALORES ECUACION	
b	2.9253
a	0.4082

CCOMPROBACION	
R	0.926
OK	

ECUACION			
Y=	0.4082	+. 2.9253	X

Anexo 8 Absorción Espectral

UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

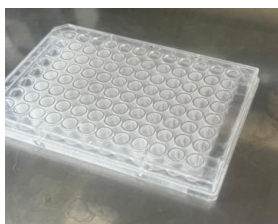
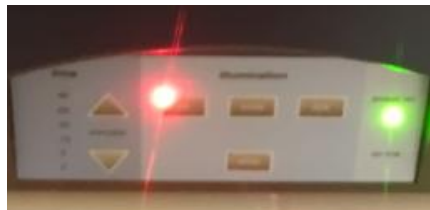
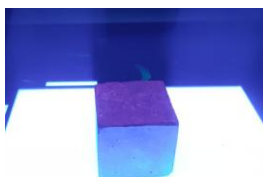
ORIGEN: UODIDE LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN

ENSAYADO POR: César Steven Guerra Cunalata

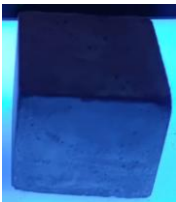
FECHA: 19/06/2025

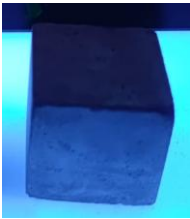
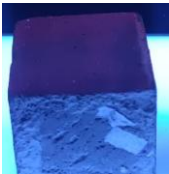
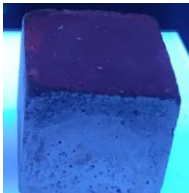
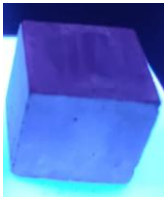
ABSORCION ESPECTRAL

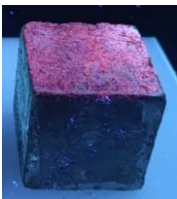
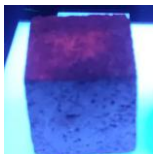
Muestra	Absorbancia UV 254 nm	Absorbancia UV 366 nm	Absorbancia VIS
M1	0.12	0.1	0.05
M2	0.28	0.25	0.1
M3	0.45	0.4	0.15
M4	0.35	0.3	0.08
M5	0.58	0.5	0.12
M6	0.75	0.7	0.2
M7	0.55	0.5	0.1
M8	0.78	0.72	0.18
M9	0.95	0.9	0.25

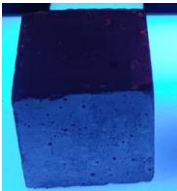
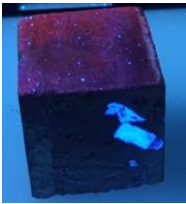


Anexo 9 Foto degradación bajo luz simulada y medición de corriente

UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
ORIGEN: UODIDE LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN ENSAYADO POR: César Steven Guerra Cunalata FECHA: 21/05/2025				
FOTO DEGRADACIÓN RODAMINA B				
Muestra	Muestra	a* (0h)	a* (4h)	R4 (%)
0% Grafeno	0% TiO2	24.5	23.33	4.78
				
0% Grafeno	0% TiO2	25.1	23.94	4.62
				
0% Grafeno	0% TiO2	24.8	23.66	4.60
				
0.05% Grafeno	0.5% TiO2	23.9	13.14	45.02
				
0.50% Grafeno	0.5% TiO2	20.5	11.13	45.71
				
1.00% Grafeno	0.5% TiO2	17.3	9.35	45.95
				

0.05% Grafeno	2% TiO ₂	22.5	10.16	54.84
				
0.50% Grafeno	2% TiO ₂	20.3	9.13	55.02
				
1.00% Grafeno	2% TiO ₂	20.2	9.09	55.00
				
0.05% Grafeno	5% TiO ₂	15.7	6	61.78
				
0.50% Grafeno	5% TiO ₂	12.8	5.13	59.92
				
1.00% Grafeno	5% TiO ₂	16.3	6.52	60.00
				

Muestra	Muestra	a* (0h)	a* (26h)	R26 (%)
0% Grafeno	0% TiO2	24.5	23.05	5.92
				
0% Grafeno	0% TiO2	25.1	26.6	5.98
				
0% Grafeno	0% TiO2	24.8	26.3	6.05
				
0.05% Grafeno	0.5% TiO2	23.9	10.75	55.02
				
0.50% Grafeno	0.5% TiO2	20.5	9.11	55.56
				
1.00% Grafeno	0.5% TiO2	17.3	7.65	55.78
				
0.05% Grafeno	2% TiO2	22.5	7.77	65.47
				

0.50% Grafeno	2% TiO ₂	20.3	7.1	65.02
				
1.00% Grafeno	2% TiO ₂	20.2	7.08	64.95
				
0.05% Grafeno	5% TiO ₂	15.7	4.5	71.34
				
0.50% Grafeno	5% TiO ₂	12.8	3.86	69.84
				
1.00% Grafeno	5% TiO ₂	16.3	4.88	70.06
				

