



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN MORTERO DE RECUBRIMIENTO CON TEXTURA LISA ADICIONADO CON NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITANIO Y POLISILOXANO CON PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS E HIDROFÓBICAS A ESCALA LABORATORIO**

**Jennyfer Amalia Paiz Rosales**

Asesorado por la PhD. Marlene Susana Arrechea Alvarado

Guatemala, enero de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN MORTERO DE RECUBRIMIENTO CON TEXTURA LISA ADICIONADO CON NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITANIO Y POLISILOXANO CON PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS E HIDROFÓBICAS A ESCALA LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JENNYFER AMALIA PAIZ ROSALES**

ASESORADO POR LA PhD. MARLENE SUSANA ARRECHEA ALVARADO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, ENERO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

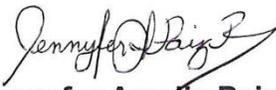
DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García (a.i.)
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN MORTERO DE RECUBRIMIENTO CON TEXTURA LISA ADICIONADO CON NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITANIO Y POLISILOXANO CON PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS E HIDROFÓBICAS A ESCALA LABORATORIO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 12 de enero de 2017.

  
**Jennyfer Amalia Paiz Rosales**



Guatemala, 15 de noviembre de 2017

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong Davi  
Director  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería – USAC

Respetable Ingeniero,

Esperando que tenga éxitos en sus actividades laborales, por este medio hago de su conocimiento que en mi calidad de asesora del trabajo de graduación de la estudiante **JENNYFER AMALIA PAIZ ROSALES**, quien se identifica con **CUI No. 2107788490107** y **registro académico No. 201113780**, de la carrera **INGENIERÍA QUÍMICA**, he revisado y aprobado el informe final del trabajo de graduación con el título **“DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN MORTERO DE RECUBRIMIENTO CON TEXTURA LISA ADICIONADO CON NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITANIO Y POLISILOXANO CON PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS E HIDROFÓBICAS A ESCALA LABORATORIO”**. Por lo que considero que el presente trabajo cumple con los requisitos necesarios para ser presentado ante las autoridades respectivas de la Escuela de Ingeniería Química y lo doy por aprobado.

Por lo tanto, dejo a su consideración que la estudiante continúe con los trámites pertinentes para la defensa y aprobación del mismo ante la terna evaluadora y su persona. Sin otro particular, agradezco su amable deferencia a la presente.

Atentamente,

  
Marlene Susana Arrechea Alvarado  
Ingeniera Química  
Col. 1,593  
M. Sc. Nanotecnología

PhD. Marlene Susana Arrechea Alvarado  
ASESORA

Investigadora de la Escuela de Ingeniería Química  
Colegiado No. 1593  
Correo electrónico: [arrecheausac@gmail.com](mailto:arrecheausac@gmail.com)





Guatemala, 17 de noviembre de 2017.  
Ref. EIQ.TG-IF.051.2017.

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong Davi  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **069-2016** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

### INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por la estudiante universitaria: **Jennyfer Amalia Paiz Rosales**.  
Identificada con número de carné: **2011-13780**.  
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN MORTERO DE RECUBRIMIENTO CON TEXTURA LISA ADICIONADO CON NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITANIO Y POLISILOXANO CON PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS E HIDROFÓBICAS A ESCALA LABORATORIO**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por la Ingeniera Química: **Marlene Susana Arrechea Alvarado**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. César Alfonso García Guerra  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería





Ref.EIQ.TG.001.2018

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **JENNYFER AMALIA PAIZ ROSALES** titulado: **"DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN MORTERO DE RECUBRIMIENTO CON TEXTURA LISA ADICIONADO CON NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITANIO Y POLISILOXANO CON PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS E HIDROFÓBICAS A ESCALA LABORATORIO"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*"Id y Enseñad a Todos"*

Ing. Carlos Salvador Wong Davi  
Director  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, enero 2018

Cc: Archivo  
CSWD/ale



Asociación Guatemalteca de Ingenieros Químicos  
Asociación de Ingenieros Químicos de Guatemala



Universidad de San Carlos  
De Guatemala

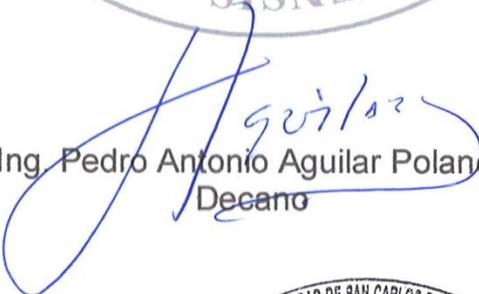


Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.014.2018

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN MORTERO DE RECUBRIMIENTO CON TEXTURA LISA ADICIONADO CON NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITANIO Y POLISILOXANO CON PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS E HIDROFÓBICAS A ESCALA LABORATORIO**, presentado por la estudiante universitaria: **Jennyfer Amalia Paiz Rosales**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, enero de 2018



## ACTO QUE DEDICO A:

<b>Dios</b>	Por ser el centro de mi existencia. Por poner ángeles en mí camino y llenar de bendiciones mi vida.
<b>Mis padres</b>	Edwar Paiz y Ligia Rosales, por ser mi mayor admiración e inspiración, por guiar mi vida con amor y alegría enseñándome a valorar lo que poseo y luchar por lo que quiero.
<b>Mis hermanas</b>	Gabriela y Fatima Paiz, por ser mis compañeras de vida y amigas, por creer en mí.
<b>Mi familia</b>	Por su apoyo, confianza y por regalarme la alegría de vivir en familia.
<b>Mis amigos y amigas</b>	Por su apoyo incondicional y su valiosa amistad a lo largo del camino.

***“Enamórate de alguna actividad y ¡hazlo! Nunca nadie realmente se da cuenta de lo que se trata la vida en realidad, y eso no importa. Explora el mundo. Prácticamente todo a nuestro alrededor es realmente interesante, si lo observas profundamente. Trabaja duro y cuanto puedas en las cosas que más te gusta hacer. No pienses en lo que quieres ser, sino lo que tú quieres hacer.”***

Richard Feynman (1918-1988).

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por darme la vida para lograr mis metas y sueños.
<b>Mis padres</b>	Por apoyarme durante mi trayectoria de estudios y guiarme en el camino de la vida.
<b>Compañeros de carrera</b>	Por acompañarme en el camino de mi formación como ingeniera y por hacer de estos años una aventura maravillosa.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por formarme en el ámbito profesional y darme las herramientas para conseguir mi realización personal.
<b>Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería</b>	Por formarme en la profesión que elegí para mí desempeño profesional.
<b>Mis profesores</b>	Por haber marcado mi formación con sus enseñanzas. Gracias especiales a la Inga. Susana Arrechea, Ing. Williams Álvarez, Ing. César García.

**Inga. Susana Arrechea**

Por su asesoría en la realización del presente trabajo de investigación. Por su confianza, conocimientos compartidos, consejos y por abrirme las puertas de nuevas oportunidades.

**Lic. Luis Velásquez**

Por brindarme la oportunidad de ser parte de su equipo de trabajo en CETEC y su apoyo para realizar este proyecto.

**Centro de Investigación  
y Desarrollo de  
Cementos Progreso**

Por abrirme las puertas de la institución y permitirme trabajar y desarrollarme en ella. Gracias especiales a: Ing. Roberto Díaz, Licda. Carmela Barrientos, William Oliva, y todos los compañeros que apoyaron este trabajo de investigación.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTADO DE SÍMBOLOS.....	XI
GLOSARIO.....	XV
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS .....	XXIII
HIPÓTESIS .....	XXV
INTRODUCCIÓN.....	XXVII
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Nanotecnología .....	7
2.2. Nanomateriales .....	8
2.3. Morteros .....	11
2.3.1. Definición .....	11
2.3.2. Componentes de los morteros .....	12
2.3.2.1. Cemento .....	12
2.3.2.2. Cal .....	12
2.3.2.3. Agregados.....	13
2.3.2.4. Agua de mezclado.....	13
2.3.2.5. Aditivos .....	13
2.3.3. Tipos y usos de los morteros.....	14
2.3.3.1. Morteros de cemento ....	14
2.3.3.2. Morteros de cal .....	15

	2.3.3.3.	Morteros de cal y cemento Portland.....	15
	2.3.4.	Morteros utilizados en Guatemala .....	16
	2.3.4.1.	Elaborados en obra .....	16
	2.3.4.2.	Premezclados .....	16
	2.3.4.3.	Predosificados .....	17
	2.3.5.	Mortero monocapa ultra liso .....	17
2.4.		Procesos de Oxidación Avanzada (POAs) .....	19
	2.4.1.	Ventajas de los POAs en tratamientos descontaminantes .....	20
	2.4.2.	Clasificación de los procesos de oxidación avanzados .....	21
2.5.		Fotocatálisis .....	22
	2.5.1.	Fotocatálisis heterogénea.....	23
	2.5.2.	Semiconductores y nanopartículas con propiedades ....fotocatalíticas.....	24
	2.5.3.	Semiconductor fotocatalítico .....	25
	2.5.4.	El catalizador en la fotocatalisis .....	27
	2.5.5.	Parámetros que influyen en la actividad fotocatalítica.....	28
2.6.		Dióxido de titanio.....	29
	2.6.1.	Producción de dióxido de titanio (TiO <sub>2</sub> ).....	32
	2.6.2.	Mecanismo de fotocatalisis del dióxido de titanio.....	33
2.7.		Siliconas.....	34
	2.7.1.	Polidimetilsiloxano (PDMS).....	34
	2.7.2.	Silanos.....	35
	2.7.3.	Resinas de silicona.....	35

2.8.	Rodamina B.....	36
2.8.1.	Mecanismo de degradación de la Rodamina B .....	37
2.9.	Hidrofobicidad.....	38
2.10.	Efecto loto .....	39
2.11.	Propiedades de autolimpieza.....	40
2.12.	Interacciones entre matriz de cemento y nanopartículas de TiO <sub>2</sub> .....	42
2.13.	Técnicas instrumentales .....	44
2.13.1.	Difracción de rayos X (XRD) .....	44
2.13.1.1.	Método de polvo cristalino o método de polvo y muestra .....	46
2.13.2.	Análisis térmico .....	47
2.13.2.1.	Termogravimetría (TGA) .....	47
2.13.2.2.	Termogramas .....	49
2.13.3.	Colorimetría .....	50
2.13.3.1.	Sistemas triestímulo (XYZ).....	50
2.13.3.2.	Sistema CIEL*a*b* (1976).....	51
2.13.3.3.	Diferencias de color CIELAB .....	52
2.13.4.	Espectrofotometría .....	54
3.	DISEÑO METODOLÓGICO .....	57
3.1.	Variables .....	57
3.2.	Delimitación del campo de estudio .....	58

3.3.	Recursos humanos disponibles.....	58
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	59
	3.4.1.    Reactivos.....	59
	3.4.2.    Instrumentos de medición.....	59
	3.4.3.    Equipo auxiliar .....	59
	3.4.4.    Cristalería .....	60
	3.4.5.    Equipo de protección personal.....	60
	3.4.6.    Software de medición y cálculos.....	60
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	61
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	61
	3.6.1.    Análisis de difracción de rayos X (XRD) .....	61
	3.6.2.    Preparación del colorante orgánico .....	61
	3.6.3.    Dispersión de las nanopartículas deTiO <sub>2</sub> .....	62
	3.6.4.    Preparación de muestras.....	62
	3.6.5.    Análisis colorimétrico .....	64
	3.6.6.    Análisis de Termogravimetría (TGA)....	64
	3.6.7.    Análisis de permeabilidad.....	65
	3.6.8.    Análisis de ángulo de contacto .....	65
	3.6.9.    Análisis de absorción de agua por capilaridad .....	66
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .....	67
3.8.	Análisis estadístico.....	69
	3.8.1.    Medidas de tendencia central .....	69
	3.8.1.1.    Media aritmética .....	69
	3.8.2.    Medidas de dispersión.....	69
	3.8.2.1.    Varianza .....	69

3.8.3.	Análisis de varianza (ANOVA).....	70
3.8.3.1.	Análisis de varianza de un solo factor.....	70
4.	RESULTADOS.....	73
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	89
5.1.	Respecto a la caracterización por difracción de rayos X en las nanopartículas de TiO <sub>2</sub> .....	89
5.2.	Respecto a la determinación de la actividad fotocatalítica .....	90
5.3.	Respecto al ensayo termogravimétrico (TGA) .....	94
5.4.	Respecto al ensayo de ángulo de contacto .....	96
5.5.	Respecto al ensayo de absorción de agua por permeabilidad .....	97
5.6.	Respecto al ensayo de absorción de agua por capilaridad .....	98
	CONCLUSIONES.....	101
	RECOMENDACIONES.....	103
	BIBLIOGRAFÍA.....	105
	APÉNDICES.....	115
	ANEXOS .....	139



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Escala relativa dimensional de los objetos. ....	7
2.	Nanomateriales como a) nanopartículas; b) nanotubos; y c) nanocapas. ....	10
3.	Composición del mortero .....	12
4.	Componentes del monocapa ultra liso .....	18
5.	Producto Monocapa Ultra Liso .....	19
6.	Comparación entre fotosíntesis y fotocátalisis.....	22
7.	Posición de las bandas de conducción y de valencia de diferentes semiconductores en un pH 0.....	24
8.	Estructura de las bandas de un material semiconductor .....	27
9.	Estructuras de anatasa y el rutilo del TiO <sub>2</sub> .....	30
10.	Etapas del proceso fotocatalítico.....	33
11.	Estructura del polidimetilsiloxano, alquil-trialcoxi-silano y representación esquemática de una resina de silicona .....	35
12.	Estructura química de la rodamina B (C <sub>28</sub> H <sub>31</sub> ClN <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).....	36
13.	Sistema RhB-TiO <sub>2</sub> bajo irradiación UV - fotorreacción sensibilizada por colorante .....	38
14.	Ángulos de contacto sobre superficies .....	39
15.	Comparación del efecto loto.....	40
16.	Representación esquemática del efecto de autolimpieza en superficies adicionadas con TiO <sub>2</sub> .....	42
17.	Difractómetro de rayos X.....	46
18.	Análisis esquemático del principio de funcionamiento TGA.....	48

19.	Termograma y curva derivada .....	49
20.	Diagrama de cromaticidad CIE .....	51
21.	Espacio de color CIELAB.....	52
22.	Funcionamiento de un colorímetro.....	55
23.	Funcionamiento de un espectrofotómetro.....	56
24.	Diagrama de difracción de rayos X obtenido con nanopartículas de TiO <sub>2</sub> en fase anatasa y rutilo.....	73
25.	Diferencia de L* en función del tiempo para diferentes adiciones de TiO <sub>2</sub> /Si.....	74
26.	Diferencia de a* en función del tiempo para diferentes adiciones de TiO <sub>2</sub> /Si.....	74
27.	Diferencia de b* en función del tiempo para diferentes adiciones de TiO <sub>2</sub> /Si.....	75
28.	Degradación de a* en función del tiempo para diferentes adiciones de TiO <sub>2</sub> /Si.....	75
29.	Degradación de L* en función del tiempo para diferentes adiciones de TiO <sub>2</sub> /Si.....	76
30.	Diferencia de E* en función del tiempo para diferentes adiciones de TiO <sub>2</sub> /Si.....	76
31.	Ángulo de contacto para la muestra Y1 antes de irradiación UV .....	77
32.	Ángulo de contacto para la muestra Y2 antes de irradiación UV .....	77
33.	Ángulo de contacto para la muestra Y3 antes de irradiación UV .....	78
34.	Ángulo de contacto para la muestra Y4 antes de irradiación UV .....	78
35.	Ángulo de contacto para la muestra Y8 antes de irradiación UV .....	79
36.	Ángulo de contacto para la muestra Y1 después de irradiación UV .....	79
37.	Ángulo de contacto para la muestra Y2 después de irradiación UV .....	80
38.	Ángulo de contacto para la muestra Y3 después de irradiación UV .....	80
39.	Ángulo de contacto para la muestra Y4 después de irradiación UV .....	81
40.	Ángulo de contacto para la muestra Y8 después de irradiación UV .....	81

41.	Porcentaje de permeabilidad.....	82
42.	Tasa de absorción de agua por permeabilidad en función del tiempo... ..	82
43.	Absorción de agua por permeabilidad a 14 días y 28 días .....	83
44.	Capacidad de succión capilar en función del tiempo .....	83
45.	Termograma de muestra Y0.....	84
46.	Termograma de muestra Y1.....	84
47.	Termograma de muestra Y2.....	85
48.	Termograma de muestra Y3.....	85
49.	Termograma de muestra Y4.....	86
50.	Termograma de muestra Y8.....	86
51.	Termograma de muestra Y5.....	87

## TABLAS

I.	Valores límite aplicados a la percepción humana de los cambios de color $\Delta E^*$ .....	54
II.	Resumen de variables.....	57
III.	Codificación de las muestras.....	67
IV.	Proporciones de mezcla del mortero de recubrimiento.....	68
V.	Medidas de variabilidad.....	71
VI.	Análisis de varianza de un solo factor .....	71



## LISTADO DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$\mu\text{m}$	Micrómetro
$\alpha$	Factor del análisis de colorimetría
$\beta$	Ancho medio del pico de difracción de máxima intensidad (rad)
$\theta$	Ángulo del pico de difracción de máxima intensidad
$A_i$	Área de la sección transversal de la probeta $i$ ( $\text{m}^2$ ).
$a^*$	Desviación del punto cromático hacia el rojo (+) o hacia el verde (-).
$B$	Tamaño del cristal (nm)
$b^*$	Desviación del punto cromático hacia el azul (+) o hacia el amarillo (-).
$^{\circ}\text{C}$	Grado centígrado
$C_i$	Capacidad de succión capilar
$\text{CIEL}^*a^*b^*$	Modelo cromático usado para describir el espacio de color.
$C_{it}$	Incremento de masa por área de la sección transversal de la probeta $i$ en el instante $t$ ( $\text{g}/\text{m}^2$ ).
$\text{cm}$	Centímetro
$\text{COVs}$	Compuestos orgánicos volátiles
$\Delta a$	Diferencia de $a^*$
$\Delta b$	Diferencia de $b^*$
$\Delta E$	Diferencia de color
$\Delta L$	Diferencia de luminosidad

<b>d</b>	Distancia interplanar
<b>DRX</b>	Difracción de rayos X
<b>e<sup>-</sup></b>	Electrón
<b>eV</b>	Electronvoltio
<b>g</b>	Gramo
<b>h</b>	Hora
<b>H<sub>0</sub></b>	Hipótesis nula
<b>H<sub>1</sub></b>	Hipótesis alterna
<b>HO<sup>-</sup></b>	Radical hidroxilo
<b>HP</b>	Caballos de fuerza
<b>K</b>	Factor de forma del cristal (0.94 granos <sup>3</sup> )
<b>kN</b>	Kilonewton
<b>km</b>	Kilómetro
<b>L*</b>	Luminosidad de la muestra va desde 0 para el negro hasta el 100 para el blanco.
<b>λ</b>	Longitud de onda
<b>mg</b>	Miligramo
<b>Mh<sub>it</sub></b>	Masa húmeda de la probeta i en el instante de lectura t (g).
<b>min</b>	Minuto
<b>mL</b>	Mililitro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>Ms<sub>i</sub></b>	Masa seca de la probeta i (g).
<b>n</b>	Número entero que representa el orden de difracción
<b>N – K</b>	Grados de libertad
<b>n<sub>k</sub></b>	Número de datos del experimento k.
<b>nm</b>	Nanómetro
<b>NO<sub>x</sub></b>	Óxidos de nitrógeno
<b>PDMS</b>	Polidimetilsiloxano

<b>POAs</b>	Procesos de oxidación avanzada
<b>RhB</b>	Rodamina B
<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto
<b>s</b>	Segundo
<b>S</b>	Desviación Estándar
<b>S<sup>2</sup></b>	Varianza
<b>Si</b>	Polvo de silicona a base de polisiloxano
<b>SS</b>	Suma de los cuadrados
<b>t</b>	Tiempo
<b>T</b>	Temperatura
<b>TiO<sub>2</sub></b>	Dióxido de titanio
<b>UV</b>	Ultravioleta
<b>TiCl<sub>4</sub></b>	Cloruro de titanio (IV)
<b>TGA</b>	Análisis de termogravimetría
<b>W</b>	Watts
$x_{kj}$	Dato del experimento k, en la repetición j.
$\bar{x}_k$	Promedio de datos del experimento k.
$\bar{\bar{x}}$	Media aritmética de los resultados de los dos experimentos.



## GLOSARIO

<b>a*</b>	Coordenadas de color rojo (positivo) a verde (negativo), pertenecientes al espacio de color CIEL*a*b*.
<b>Aditivos</b>	Material añadido en pequeñas cantidades con relación a la masa del cemento, antes o durante la mezcla del mortero, para modificar sus propiedades.
<b>ASTM</b>	Sociedad Americana de Ensayo de Materiales
<b>b*</b>	Coordenadas de color amarillo (positivo) a azul (negativo), pertenecientes al espacio de color CIEL*a*b*.
<b>Cemento</b>	Mezcla de caliza y arcilla, sometida a calcinación y molienda, que tiene la propiedad de hidratarse al contacto con el agua.
<b>Cemento Portland</b>	Aglomerante hidráulico compuesto de silicatos y aluminatos cálcicos que al amasarse con agua forma una pasta que endurece con las reacciones de hidratación.

<b>CIE</b>	Comisión Internacional de Iluminación, principal organización internacional interesada en el color y manejo del espacio de color.
<b>Colorimetría</b>	Ciencia que estudia objetivamente los colores y su medición, teniendo en cuenta la percepción por el ojo humano.
<b>Colorímetro</b>	Instrumento que mide el color.
<b>Curado del cemento</b>	Proceso de cubrir el cemento con agua de modo que permanezca húmedo durante su hidratación para mejorar la adherencia entre la pasta y los agregados.
<b>Difractograma</b>	Gráfica obtenida del difractómetro de rayos X con los datos de intensidad en función del ángulo de difracción ( $2\theta$ ), dibuja una serie de picos.
<b>Fenton</b>	Proceso de oxidación avanzada en el cual se producen radicales altamente reactivos del hidroxilo ( $\text{OH}\cdot$ ).
<b>Fotocatálisis</b>	Reacción que utiliza la luz para activar un catalizador en presencia de oxígeno.
<b>Fotólisis</b>	Disociación de moléculas por efecto de la luz.

<b>Fraguado del cemento</b>	Endurecimiento de la pasta de cemento luego de adicionar agua, cambio de estado fluido al estado rígido.
<b>Hidrofobicidad</b>	Capacidad de un material para repeler el agua en su superficie.
<b>Hidrofilicidad</b>	Afinidad que tiene una superficie con las moléculas de agua.
<b>Hidrófugo</b>	Capacidad en los revestimientos de tener baja permeabilidad al agua y buena permeabilidad a vapor de agua.
<b>Impermeabilidad</b>	Capacidad de resistir el paso del agua.
<b>IUPAC</b>	Unión Internacional de Química Pura y Aplicada
<b>Luminosidad</b>	Es el atributo de percepción que se refiere al grado en el cual el color exhibe más o menos luz.
<b>Mortero</b>	Mezcla de cemento, agregados y aditivos en polvo a los cuales se les agrega agua para preparar una mezcla.
<b>Mortero monocapa ultra liso</b>	Mortero de acabado fino y con rugosidad de 1,0 mm, es fabricado industrialmente y se suministra listo para mezclar con agua.

<b>Mojabilidad</b>	Fenómeno de interacción interfacial que determina el ángulo de contacto formado entre una gota de líquido y la superficie de un sólido.
<b>Nanociencia</b>	Estudia los fenómenos que ocurren a escalas comprendidas entre 0,1 y 100 nanómetros.
<b>Nanocompuestos</b>	Materiales amorfos, hechos a partir de distintos componentes y trabajados en escala nanométrica.
<b>Nanomateriales</b>	Materiales con propiedades morfológicas más pequeñas que un micrómetro.
<b>Nanómetro</b>	Equivale a una millonésima parte del milímetro.
<b>Nanopartícula</b>	Partícula microscópica con una dimensión menor o igual a 100 nm.
<b>Nanotecnología</b>	Campo de tecnologías que incluyen la manipulación y control de las estructuras moleculares en escalas comprendidas entre 1 y 100 nanómetros.
<b>Recubrimiento</b>	Material con el que será recubierto un sustrato.
<b>Superhidrofóbico</b>	Material que posee un ángulo de contacto mayor a 150°.
<b>Termograma</b>	Representación gráfica de la variación de masa de una muestra frente a la temperatura.

<b>Termogravimetría</b>	Técnica de análisis instrumental que se basa en la variación de la masa de una muestra al someterla a un cambio de temperatura en una atmósfera controlada.
<b>Trabajabilidad</b>	Medida de la habilidad de un mortero en estado plástico a adherirse, deslizarse y desplegarse fácilmente en paredes.
<b>Tubo de Karsten</b>	Tubo graduado de vidrio transparente que posee una base circular de 2,5 cm de diámetro.



## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación, se adicionaron diferentes proporciones en peso de nanopartículas de dióxido de titanio y polvo de silicona de polisiloxano ( $\text{TiO}_2/\text{Si}$ ) a un mortero de recubrimiento con textura lisa, con el fin de proveer actividad fotocatalítica heterogénea y propiedades hidrofóbicas a las muestras resultantes. Las nanopartículas de dióxido de titanio se caracterizaron mediante un análisis de difracción de rayos X (XRD); posteriormente, se realizó la mezcla del mortero con las adiciones de  $\text{TiO}_2/\text{Si}$ . Se moldearon probetas cubicas, las cuales, después del tiempo de curado fueron sometidas a irradiación UV, para degradar el colorante orgánico rodamina B. Durante el proceso, se monitoreó su variación de color mediante un espectrofotómetro en escala CIEL\*a\*b\*. A estas probetas, se les realizó un análisis de termogravimetría (TGA). Así mismo, se evaluó la permeabilidad al agua en las muestras, mediante el tubo de Karsten y el ensayo de absorción capilar de agua. Finalmente, se estudiaron las interacciones que se producen entre la fase líquida y la superficie del mortero, para determinar el ángulo de contacto.

Con los datos obtenidos se realizaron gráficas para comparar la variación de masa, la pérdida de color, el porcentaje de permeabilidad en el tiempo para cada una de las muestras de mortero de recubrimiento adicionadas con  $\text{TiO}_2/\text{Si}$ . Mediante un análisis de varianza con el 95% de confiabilidad se determinó que el parámetro de color de luminosidad  $L^*$  acepta la hipótesis nula, por lo que no existe diferencia significativa entre los valores de  $L^*$  para las muestras de mortero de recubrimiento adicionados con nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  y las muestras de mortero de recubrimiento adicionados con  $\text{TiO}_2/\text{Si}$ . Los parámetros de color  $a^*$  y  $b^*$  rechazan la hipótesis nula; de esto se infiere que las medias de los parámetros

de color  $a^*$  y  $b^*$  difieren significativamente entre sí. El tiempo de exposición a la luz UV afecta significativamente a los parámetros de color  $a^*$  y  $b^*$ .

Por lo tanto se confirmó, que el mortero de recubrimiento con textura lisa presenta propiedades de autolimpieza e hidrofóbicas, mediante la adición de nanopartículas de dióxido de titanio y silicona de polisiloxano. Además, se evidenció que las muestras adicionadas con nanopartículas de  $TiO_2$  y polisiloxano presentan la mayor eficiencia de actividad fotocatalítica al degradar la rodamina B con adición de 1,0% $TiO_2$ -0,5%Si.

## OBJETIVOS

### General

Evaluar la actividad fotocatalítica heterogénea en muestras de mortero de recubrimiento con textura lisa adicionado con diferentes proporciones de nanopartículas de dióxido de titanio y polvo de sílica de polisiloxano ( $\text{TiO}_2/\text{Si}$ ), para proveer a las muestras resultantes de propiedades de autolimpieza e hidrofóbicas.

### Específicos

1. Caracterizar las propiedades de las nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  en fase anatasa y rutilo, mediante un análisis de difracción de rayos X (XRD).
2. Caracterizar las propiedades de hidratación del mortero ultra liso adicionado con  $\text{TiO}_2/\text{Si}$ , mediante un análisis de termogravimetría (TGA).
3. Evaluar la actividad fotocatalítica heterogénea mediante un análisis colorimétrico, con la exposición a radiación UV sobre muestras de mortero de recubrimiento con textura lisa adicionado con  $\text{TiO}_2/\text{Si}$  y  $\text{TiO}_2$ , para la degradación del colorante orgánico Rodamina B.
4. Establecer las dosificaciones óptimas de  $\text{TiO}_2/\text{Si}$  que incrementen la actividad fotocatalítica heterogénea, para su adición en un mortero de recubrimiento con textura lisa.

5. Determinar la permeabilidad del mortero de recubrimiento con textura lisa con diferentes adiciones de  $\text{TiO}_2/\text{Si}$ , mediante un análisis de penetración de agua controlada por el tubo de Karsten.
6. Medir el ángulo de contacto entre la fase líquida y el mortero de recubrimiento adicionado con  $\text{TiO}_2/\text{Si}$ , mediante el método de la gota sésil.
7. Evaluar la absorción de agua por capilaridad en muestras de mortero de recubrimiento con textura lisa adicionado con  $\text{TiO}_2/\text{Si}$ , mediante la capacidad de succión capilar.

# HIPÓTESIS

## Hipótesis conceptual

Es posible evaluar el comportamiento de la degradación de la rodamina B en muestras de mortero de recubrimiento liso con incorporación de diferentes porcentajes de TiO<sub>2</sub>/Si, mediante el monitoreo de las interacciones químicas de cada componente para evaluar las variaciones de las coordenadas de color L\*, a\*, b\* por efecto de la exposición a una fuente de luz ultravioleta en función del tiempo.

## Hipótesis estadística

### Hipótesis nula

**H<sub>0</sub>:** No existe diferencia significativa entre los valores de L\*, a\*, b\* para las muestras de mortero de recubrimiento adicionados con nanopartículas de dióxido de titanio TiO<sub>2</sub> y las muestras de mortero de recubrimiento adicionados con TiO<sub>2</sub>/Si.

$$H_0: \mu_{\alpha_1} = \mu_{\alpha_2} = 0$$

### Hipótesis alternativa

**H<sub>1</sub>:** Existe diferencia significativa entre los valores de L\*, a\*, b\* para las muestras de mortero de recubrimiento adicionados con nanopartículas de dióxido de titanio TiO<sub>2</sub> y las muestras de mortero de recubrimiento adicionados con TiO<sub>2</sub>/Si.

$$H_1: \text{al menos una } \mu_{\alpha_1} \neq 0$$



## INTRODUCCIÓN

La ingeniería y la ciencia de los materiales implican investigar la relación entre la estructura y las propiedades de los materiales. La nanociencia incluye el estudio y control de la nanoescala ( $1 \times 10^{-9}$ ). En este tamaño se pueden manejar o reorientar átomos, moléculas para modificar sus propiedades en nuevas formas, impresionantes e impredecibles.

La nanotecnología y, por tanto, los nanomateriales realizan grandes avances en la industria y la investigación de los países desarrollados y repercuten de forma considerable en los países en vías de desarrollo. Prácticamente no hay aplicación social, medioambiental y económica que no esté involucrado en dichos avances. La construcción, como eje fundamental en el desarrollo y bienestar de Guatemala, también está liderando importantes innovaciones a través de los nuevos materiales y procesos que suponen la incorporación de los nanomateriales. Se convierte, además, en la industria que recoge una gran parte de las aplicaciones desarrolladas en distintos ámbitos, como cerámica, vidrio, metalurgia, polímeros, cementos y sus derivados, aditivos químicos, entre otros.

En este trabajo de investigación se llevó a cabo la mezcla de diferentes proporciones nanopartículas de dióxido de titanio y polvo de silicona ( $\text{TiO}_2/\text{Si}$ ), para su adición en un mortero de recubrimiento con textura lisa, para proveer a las muestras resultantes de actividad fotocatalítica heterogénea y propiedades hidrofóbicas.



## 1. ANTECEDENTES

La actividad fotocatalítica del dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) es un mecanismo con diferentes aplicaciones, como la purificación del aire. El dióxido de titanio puede ser combinado con otros compuestos para aumentar su eficacia fotocatalítica mientras que se reducen los costos de producción. La aplicación de la fotocatalisis heterogénea con nanopartículas de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) en morteros de recubrimiento, tiene como objetivo lograr el efecto de autolimpieza, debido a las reacciones de reducción y oxidación promovidas por la luz ultravioleta en la superficie del fotocatalizador, así como el efecto de descontaminación debido a la oxidación de contaminantes atmosféricos y la hidrofobicidad inducida por síntesis con compuestos adicionales como el polvo de silicona. La aplicación de un compuesto fotocatalíticamente activo afecta a la energía de superficie y las superficies se modifican para ser hidrófobas, lo cual tiene implicaciones sobre la adherencia y permeabilidad de los morteros de recubrimiento.

Los morteros de recubrimiento se utilizan, generalmente, para mejorar las propiedades superficiales de una pared, como la permeabilidad, la resistencia a la corrosión y la adhesión. Por otro lado, los polímeros de silicona se añaden a los materiales de construcción para reducir la entrada de productos químicos nocivos, mediante la creación de condiciones hidrófobas en las zonas cercanas a la superficie. Esto, combinado con propiedades fotocatalíticas, innova los materiales de construcción que ofrecen un mejor rendimiento, que los convencionales productos de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ).

Los primeros experimentos en el laboratorio sobre la actividad de autolimpieza en materiales a base de cemento con  $\text{TiO}_2$ , fue para el diseño de la mezcla de hormigón de la iglesia *Dives in Misericordia* en Roma, Italia y el edificio *Cite de la Musique et des Beaux Arts* en Cambery, Francia.<sup>1</sup>

El descubrimiento de los procesos fotocatalíticos se les atribuye a Akira Fujishima y Kenichi Honda en 1967.<sup>2</sup> Esta reacción se descubrió cuando mediante la construcción de un circuito electroquímico empleando dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y platino (Pt) sumergidos en agua, se produjo la disociación del agua en hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y oxígeno ( $\text{O}_2$ ) cuando el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) era irradiado con luz procedente de una lámpara de xenón. Esta investigación describe que, al irradiar el catalizador con fotones, su absorción promueve un salto de un electrón de la banda de valencia a la de conducción, generando pares electrón-hueco.

En Guatemala, en 2008 la Inga. Química Andrea Rodas, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, asesorada por el Ing. César García presentó su trabajo de graduación denominado *Compilación monográfica de información acerca de un proyecto de desarrollo científico y tecnológico de la nanotecnología en Guatemala*,<sup>3</sup> en este documento incluye una compilación bibliográfica para el establecimiento de condiciones necesarias de la nanociencia y nanotecnología a fin de conocer los fundamentos básicos, los requerimientos de infraestructura

---

<sup>1</sup> GUERRA, Valentina. *Attività fotocatalitica del biossido di titanio applicato ai materiali da costruzione. Analisi delle prestazioni in funzione della tipologia di supporto e della tecnica di deposizione.* p.63.

<sup>2</sup> SIÑERIZ MARTÍNEZ, María. *Aplicaciones arquitectónicas de los nanomateriales en base de titanio. Envolventes fotocatalíticas.* p.9.

<sup>3</sup> RODAS Morán, Andrea Eunice. *Compilación monográfica de información acerca de un proyecto de desarrollo científico y tecnológico de la nanotecnología en Guatemala.* p.254.

básica de laboratorio para la investigación y desarrollo en nanociencia y nanotecnología, así como la proposición de proyectos viables en Guatemala, como el *top-botton* de nanoencápsulados.

En el año 2011, los italianos D. Meroni, S. Ardizzone, G. Cappelletti, M. Ceotto, M. Ratti, R. Annunziata, M. Benaglia y L. Raimondi, de la Universidad de Milán investigaron en el tema *Interplay between Chemistry and Texture in Hydrophobic TiO<sub>2</sub> Hybrids* o Interacción entre la química y la textura en híbridos de TiO<sub>2</sub> hidrofóbicos.<sup>4</sup> Este trabajo aborda las interacciones químicas de las moléculas hidrofóbicas para la interpretación de la humectabilidad en comparación con la textura de una superficie. La caracterización AFM de la topografía de la superficie de las películas de TiO<sub>2</sub>, muestra la aparición de rugosidad multiescala, debido a la presencia de nanopartículas y agregados de tamaño micrométrico de estado sólido de sílice. Los resultados muestran que los modos de fijación de silicio, además de cambiar con el contenido de siloxano de la superficie, son afectados por su estructura. Por lo tanto, se concluyó que la estructura del siloxano parece ser un parámetro clave para definir las características de humectabilidad de la superficie por el agua.

En el año 2012, el Ing. Químico José Guerrero García de la Universidad de San Carlos de Guatemala, asesorado por el Ing. Víctor Echeverría, abordó el tema *Diseño y evaluación de un mortero fino tipo repello con acabado alisado y propiedades de hidrofobicidad para una empresa de acabados de la construcción*.<sup>5</sup> En este trabajo de graduación se presenta el desarrollo y evaluación de un mortero fino tipo repello con adiciones de polvo redispersable y

---

<sup>4</sup> MERONI, D., et al. *Interplay between Chemistry and Texture in Hydrophobic TiO<sub>2</sub> Hybrids*. p.18649-18658.

<sup>5</sup> GUERRERO G., José L. *Diseño y evaluación de un mortero fino tipo repello con acabado alisado y propiedades de hidrofobicidad para una empresa de acabados de la construcción*. p.103.

fibras de celulosa. Se realizaron ensayos de adherencia y permeabilidad, evaluados mediante el método de Karsten. De acuerdo con los resultados, el aumento en fórmula del polvo redispersable favorece las propiedades de adherencia y permeabilidad de un mortero. La prueba con mejores resultados obtenidos de resistencia a la adhesión fue con 0,16% de polvo redispersable en fórmula.

En el año 2012, José Rubén Rodríguez García realizó su trabajo de graduación del Master Universitario en Innovación Tecnológica en la Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid, con el tema *Morteros fotocatalíticos: análisis de su autolimpieza en función del tipo de cemento y rugosidad superficial*.<sup>6</sup> Se realizó un estudio en el que se evaluaron qué cementos proporcionan mayor efectividad en función de su composición y qué rugosidad superficial funciona mejor en la autolimpieza, debido a esto se estudiaron morteros con acabados lisos y con distintas rugosidades hasta 1,5 mm de irregularidad. Los resultados obtenidos fueron que las probetas con rugosidades altas, presentan una mayor efectividad de degradación, durante las primeras horas, pero con el paso del tiempo de exposición, su efectividad disminuye y las probetas terminan lisas. Estas presentan una mayor efectividad en la autolimpieza, porque al principio, con mayor cantidad de colorante, las probetas más rugosas y con mayor área de contacto consiguen degradarlo en mayor medida, sin embargo con el paso del tiempo debido a su rugosidad se les dificulta degradar estos colorantes, cuando sus cantidades son pequeñas.

En el año 2012, los investigadores Xiaofeng Ding, a Shuxue Zhou, Guangxin Gua y Limin Wu, de Shanghai, China, publicaron la investigación científica titulada *Fabrication of ambient-curable superhydrophobic fluoropolysiloxane/TiO<sub>2</sub>*

---

<sup>6</sup> RODRÍGUEZ G. José R. *Morteros fotocatalíticos: análisis de su auto-limpieza en función del tipo de cemento y rugosidad superficial*. p. 2.

*nanocomposite coatings with good mechanical properties and durability o*  
*Fabricación de un recubrimiento del nanocompuesto superhidrofóbico de*  
*polisiloxano flúorado/TiO<sub>2</sub> con buenas propiedades mecánicas y durabilidad.*<sup>7</sup>  
Prepararon revestimientos de nanocompuestos superhidrofóbicos, mediante la mezcla de un aglutinante hidrófobo con nanopartículas de TiO<sub>2</sub>. El aglutinante fue fluoropolysiloxano trietoxisilil (FPU), polimetilfenil-siloxano (PMP), y 3-aminopropiltriethoxisilano. La humectabilidad de la superficie, la morfología, las propiedades mecánicas, y resistencia a la intemperie se determinaron, utilizando el análisis de ángulo de contacto, SEM, AFM, la dureza de péndulo y mediciones de nanoindentación. Los revestimientos con mejores propiedades superhidrofóbicas se sinterizaron con relaciones en peso de FPU/PMP mayores que 1:9, y cargas de TiO<sub>2</sub> mayores del 35% en peso. Los recubrimientos superhidrofóbicos presentan buena resistencia mecánica, excelente durabilidad a la intemperie y la resistencia a los contaminantes orgánicos. Se demostró que las nanopartículas de TiO<sub>2</sub> actuaban como fotocatalizador para la descomposición de contaminantes orgánicos.

En el año 2015, los investigadores M. Faraldos, R. Kropp, M.A. Anderson, K. Sobolev, realizaron el estudio *Photocatalytic hydrophobic concrete coatings to combat air pollution o Recubrimientos para concreto, fotocatalíticos e hidrófobos para combatir la contaminación del aire.*<sup>8</sup> Revestimientos de superficies fotocatalíticas se aplicaron a las superficies de cemento y fueron probadas como una técnica de recuperación de emisiones de NO<sub>x</sub> y transporte de contaminantes

---

<sup>7</sup> ZHOU, Shuxue; DING, Xiaofeng; WU, Limin. *Fabrication of ambient-curable superhydrophobic fluoropolysiloxane/TiO<sub>2</sub> nanocomposite coatings with good mechanical properties and durability.* p. 563-570.

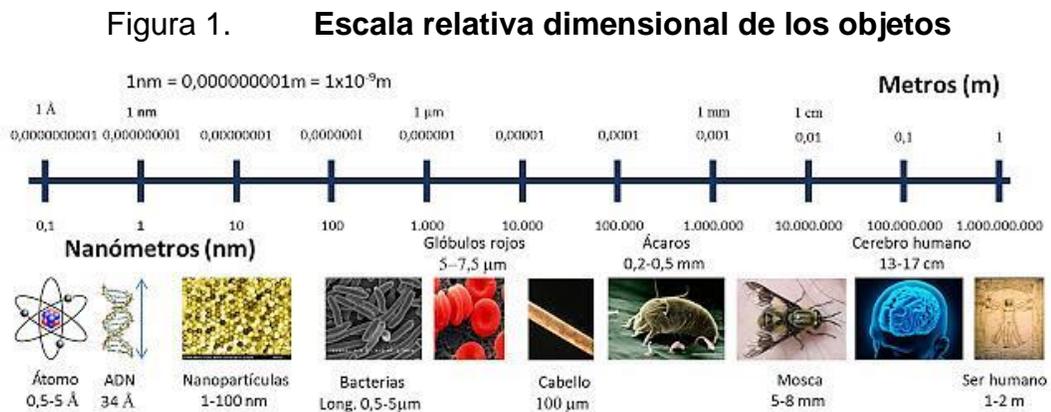
<sup>8</sup> FARALDOS, M., et al. *Photocatalytic hydrophobic concrete coatings to combat air pollution.* p.228-236.

orgánicos. Las suspensiones acuosas de nanopartículas para revestimientos mostraron un alto contenido de conversión (90%) de óxido de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y degradación del colorante azul de metileno al aplicarlo a superficies de hormigón, incluso cuando el recubrimiento era extremadamente delgado o diluido, independiente del método de deposición (de pulverización o por inmersión). El revestimiento hidrofóbico basado en nanopartículas de fotocatalizador en suspensión con un sellador de siloxano muestra conversión a bajas concentraciones de  $\text{NO}_x$ , pero requiere una mayor carga de  $\text{TiO}_2$ . A altas concentraciones de  $\text{NO}_x$  el recubrimiento hidrófobo fue menos eficaz, incluso a grandes cargas de  $\text{TiO}_2$ , lo que sugiere que la absorción es el paso limitante en este proceso de conversión. Se necesita un umbral de 1% en carga de  $\text{TiO}_2$  y 5% en el caso de hidrófobo para obtener una conversión de  $\text{NO}_x$  cuantitativa a especies no tóxicas como nitratos.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Nanotecnología

La ASTM define a la Nanotecnología como un campo que incluye tecnologías que miden, manipulan o incorporan materiales con una o varias de sus dimensiones comprendidas entre 1 y 100 nm, como muestra la figura 1.



Fuente: EL FARO NANOTECNOLÓGICO. *Nanómetro*. <http://elfaronanotec.blogspot.com/2016/>  
Consulta: julio de 2017.

La nanotecnología es el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a nanoescala a partir del reordenamiento de átomos y moléculas, y la explotación de fenómenos y propiedades. Cuando se manipula la materia a la escala tan reducida de átomos y moléculas, se demuestran fenómenos y propiedades totalmente nuevas. La nanotecnología permite soluciones vanguardistas, poco costosas y más eficientes para los problemas ambientales y sociales.

El desarrollo de esta disciplina se produce a partir de las propuestas del físico Richard Feynman, quién es considerado el padre de la nanociencia, es premio Nobel de Física, quién en 1959 propuso fabricar productos con base en un reordenamiento de átomos y moléculas. Escribió un artículo que analizaba cómo las computadoras trabajando con átomos individuales podrían consumir muy poca energía y conseguir velocidades asombrosas.<sup>9</sup> Feynman fue pionero en la visión de las posibilidades que este campo podía proporcionar.

No fue sino hasta los años 80 cuando el avance de las técnicas experimentales posibilitó, primero, observar los materiales a escala atómica y, después, manipular átomos individuales. Actualmente, gracias a esta ciencia se está investigando acerca de la creación de nuevos materiales resultantes de la modificación de sus propiedades. Estos materiales pueden ser diseñados para actuar de una determinada manera de forma controlada, lo que abre posibilidades en diversos ámbitos de aplicación, como medicina, construcción, alimentación, informática, industria textil, etc. Los materiales reducidos a la nanoescala pueden mostrar propiedades muy diferentes a las que exhiben en una macroescala, posibilitando aplicaciones únicas.

## **2.2. Nanomateriales**

Los nanomateriales presentan propiedades morfológicas más pequeñas que un micrómetro. La Comisión Europea definió el término nanomaterial como un material formado por partículas presentes de forma individual o formando agregados o aglomerados, donde el 50% o más de las partículas poseen una distribución de tamaños en una o en varias dimensiones, en el rango de 1 nm a 100 nm. Este porcentaje puede disminuir hasta en un 1% en algunos casos. Un

---

<sup>9</sup> CASTILLO RODRÍGUEZ, F.D. *Introduction to nanomaterials*. p.2.

nanomaterial puede tener múltiples orígenes, generarse de forma natural, accidental o intencionadamente.<sup>10</sup>

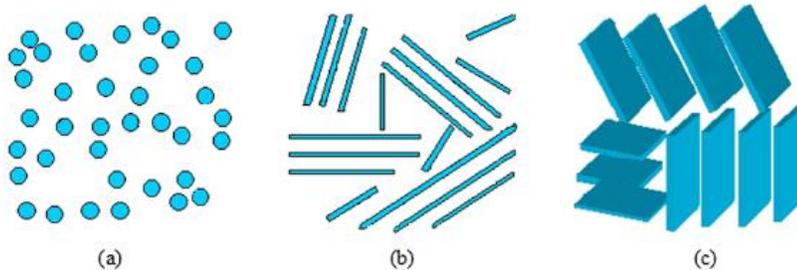
La clasificación, según el número de dimensiones de estos materiales, incluida en la nanoescala puede ser:

- Nanopartículas. Todas sus dimensiones están incluidas dentro de la nanoescala. Esta categoría se considera dimensional, ya que ninguna de sus dimensiones supera los 100 nm.
- Nanotubos y nanofilamentos. Solo dos de sus dimensiones están incluidas en la nanoescala. Esta diferencia en las dimensiones materiales da lugar a los nanomateriales en forma de aguja.
- Nanocapas y nanorrevestimientos. Únicamente una de sus dimensiones está incluida en la nanoescala. Estos materiales muestran formas de lámina, como puede verse en la figura 2.
- Nanocristales y nanocompuestos. Ninguna de sus dimensiones está dentro de la nanoescala. La razón por la que estos materiales se consideran nanomateriales, aunque no se ajusten a la nanoescala, es porque presentan una estructura nanocristalina, o bien ciertas características incluidas en la nanoescala.

---

<sup>10</sup> GÓMEZ JIMÉNEZ, Virginia. *Aerosoles formados por nanomateriales. Monitorización y evaluación de la exposición en entornos laborales.* p. 270.

Figura 2. **Nanomateriales como a) Nanopartículas; b) Nanotubos y c) Nanocapas**



Fuente: CHAUDHRY, Qasim. *Nanotechnologies in food*. p. 2.

Muchas de las propiedades de los nanomateriales dependen de cómo se comporten los electrones que se mueven en su seno o de cómo estén ordenados los átomos en la materia. En un material nanométrico, el movimiento de los electrones está muy limitado por las dimensiones del propio material. Además, la proporción de átomos en la superficie con respecto al interior es más alta que en materiales de tamaño más elevado. Por consiguiente, si se reducen las dimensiones de un material, se modifican sus propiedades y en consecuencia se pueden diseñar materiales con propiedades nuevas.

La Agencia del Medio Ambiente (EPA) de los Estados Unidos de América ha clasificado los nanomateriales actuales en cuatro tipos, a saber:<sup>11</sup>

- Basados en metales. Estos nanomateriales incluyen puntos cuánticos, nanopartículas de oro y plata y óxidos metálicos como el dióxido de titanio.
- Basados en carbono. Estos nanomateriales están compuestos mayoritariamente por carbono y suelen adoptar formas como esferas huecas, elipsoides o tubos. Los nanomateriales de carbono con forma elipsoidal o esférica se conocen como fullerenos, mientras que los

<sup>11</sup> CASTILLO RODRIGUEZ, F.D. *Introduction to nanomaterials*. p.6.

cilíndricos reciben el nombre de nanotubos. Estas partículas tienen muchas aplicaciones posibles, incluido el desarrollo de recubrimientos y películas mejoradas, materiales más ligeros y resistentes y diversas aplicaciones en el campo de la electrónica.

- Dendrímeros. Estos nanomateriales son polímeros de tamaño nanométrico contruidos a partir de unidades ramificadas. La superficie de un dendrímero tiene numerosos extremos de cadena, que se pueden adaptar para desempeñar funciones químicas específicas. Esta propiedad se podría utilizar también para la catálisis.
- Compuestos. Los compuestos combinan las nanopartículas con otras nanopartículas o con materiales de mayor tamaño.

## **2.3. Morteros**

### **2.3.1. Definición**

El mortero es un material de construcción constituido por una mezcla de cemento, agregado fino y otro material aglomerante como cal o yeso, como se muestra en la figura 3; que con la adición de agua reacciona y adquiere resistencia, también puede estar compuesto por aditivos que mejoren sus propiedades tanto en estado fresco como endurecido. Al endurecer el mortero presenta propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las del concreto y es ampliamente utilizado para pegar piezas de mampostería en la construcción de muros (mortero de mampostería), o para recubrirlos; en cuyo caso, se le conoce como mortero de acabado o recubrimiento, repello o revoque. Estéticamente, el mortero es diseñado para recubrir las paredes y cielos de una construcción añadiéndoles una textura y color muy particular, logrando la presentación estética que la obra requiere.

Figura 3. **Composición del mortero**



Fuente: LEROY MERLIN. *Dosificar y preparar hormigón*. p.2

## 2.3.2. Componentes de los morteros

### 2.3.2.1. Cemento

El cemento es un material aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión, las cuales permiten unir fragmentos minerales entre sí, para formar una mezcla compacta con resistencia y durabilidad. Este tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua ya que con ella experimenta una reacción de hidratación.

### 2.3.2.2. Cal

Se llama cal a todo producto que procede de la calcinación de las piedras calizas, estas son piedras naturales calcáreas, compuestas por carbonato de calcio mezclado generalmente con alúmina, sílice, magnesia, óxidos de hierro y de manganeso, al calcinarlas se obtiene la cal. Las propiedades hidráulicas del material obtenido se le atribuyen a los silicatos, aluminatos y ferritos formados.

### **2.3.2.3. Agregados**

Son materiales pétreos inertes que provienen de la acción natural de desintegración de las piedras o mediante procesos artificiales de trituración de las mismas. Es considerado el material de relleno de la mezcla.

Los agregados se dividen por su tamaño en finos (los que pasan por el tamiz No.4) y gruesos (retenidos por el tamiz No.4 y que pasan por el No.6). En la mezcla de un mortero solo se utiliza el agregado fino, del cual se tienen variedades tales como arena de río, volcánica, amarilla, blanca o la mezcla entre ellas. Se utiliza el agregado fino o arena, tal como se encuentra en la naturaleza o proveniente de la trituración de las rocas. Los agregados deben tener preferentemente forma redondeada, para mayor trabajabilidad.

### **2.3.2.4. Agua de mezclado**

El agua es el componente que provoca la hidratación de las partículas de cemento y sirve de agente mezclador en los demás componentes del mortero. Es el principal elemento que afecta la trabajabilidad, fluidez y consistencia del mortero. Casi cualquier agua natural que sea potable y que no tenga un sabor u olor pronunciado se puede utilizar para producir mortero, para asegurar que las impurezas en el agua no afecten el tiempo de fraguado del cemento.

### **2.3.2.5. Aditivos**

Los aditivos son compuestos que se utilizan para mejorar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los morteros, en estado fresco como endurecido. Es un componente añadido durante la mezcla del mortero y por medio del cual se puede manipular positivamente una o varias de sus

propiedades en estado plástico o sólido sin perjudicar otras. Su utilización, efecto, duración y resultados dependen del clima, dosificación, agregados, elemento de aplicación y la experiencia con su uso.

### **2.3.3. Tipos y usos de los morteros**

En términos generales, entre de los morteros se pueden distinguir dos familias: los aéreos y los hidráulicos. Los morteros aéreos endurecen bajo la influencia del aire al perder agua por secado al aire y fraguan lentamente por un proceso de carbonatación. Los hidráulicos, endurecen bajo agua, ya que, igual que los cementos naturales, posee en su composición, constituyentes que se obtienen por calcinación de calizas impurificadas con sílice y alúmina que le permiten desarrollar resistencias iniciales relativamente altas. De acuerdo con los materiales que lo componen, se tienen los morteros de cemento o cal.

#### **2.3.3.1. Morteros de cemento**

Cuando se requieren altas resistencias iniciales o resistencias elevadas del mortero, se pueden utilizar como aglomerantes los cementos naturales o los cementos Portland. La confección de este mortero ha de efectuarse de un modo continuo, de manera tal que entre el mezclado y la colocación en obra haya el menor tiempo posible debido a lo rápido del fraguado del cemento. Por ello se acostumbra a mezclar en obra, primero el cemento y la arena y, luego, se añade el agua. Desde luego, la cantidad de cemento no puede disminuir mucho, ya que, si la mezcla es muy pobre en aglomerante, se hace áspera e intrabajable porque las partículas de arena rozarán entre sí, al no existir la pasta lubricante de cemento.

### **2.3.3.2. Morteros de cal**

A los morteros de cal también se le conocen con el nombre de calcáreos debido a que es un plastificante y ligador el cual fragua o endurece al ser expuesto al aire. Estas características hacen del mortero de cal el más manejable de los conocidos. Sin embargo, no pueden esperarse de él altas resistencias iniciales, debido a su baja velocidad de endurecimiento.

Las cales aéreas más conocidas son la cal blanca y la cal dolomítica (cal gris). La arena en este caso, en realidad, constituye un material inerte cuyo objetivo principal es evitar el agrietamiento y contracción del mortero. Para ello, se recomienda que tenga partículas angulosas y esté libre de materia orgánica, piedras grandes, polvo y arcilla. Las proporciones cal-arena más usadas en morteros aéreos son 1:2 para acabados y 1:3 o 1:4 para morteros de levantado (cal: arena).

### **2.3.3.3. Morteros de cal y cemento Portland**

Cuando se busca una gran trabajabilidad, buena retención de agua y altas resistencias iniciales, este tipo de mortero es aconsejable. Utilizando como base un mortero 1:3 se puede ir sustituyendo parte del cemento por cal. Estos morteros reciben el nombre de morteros de cemento rebajados cuando el contenido de cemento es escaso. Las proporciones más usadas en Guatemala varían de 1:1/4:2 a 1:1:4 (cemento: cal: arena). La cantidad de agua se encuentra dentro de amplios límites, de acuerdo con la composición del mortero y la consistencia deseados.

Si el contenido de cemento es alto, las características serán alta resistencia, poco tiempo entre amasado y colocación, mezcla más o menos trabajable y habrá contracción (3%) si está muy seco. Si el contenido de cal es alto, tendrá menos

resistencia, será mayor el tiempo entre amasado y colocación, será más plástico y permeable, pero mostrará más retracción (expansión de volumen 9%). Si el contenido de arena es alto, la resistencia disminuirá considerablemente y será poco trabajable pero el mortero tendrá poca retracción. Los morteros hechos de cemento Portland y cal deben combinarse de tal manera que se aprovechen las propiedades adhesivas de la cal y las propiedades cohesivas del cemento Portland, siendo importante tener en cuenta que cada adición de cal incrementa la cantidad de agua de mezclado necesaria.

#### **2.3.4. Morteros utilizados en Guatemala**

##### **2.3.4.1. Elaborados en obra**

El mortero fabricado en la obra es más propenso a que varíe su dosificación, estas afectan la productividad del albañil y la resistencia del mortero, las proporciones más utilizadas en el país varían entre 1:1/8:2 a 1:1:7 (cemento: cal: arena).

##### **2.3.4.2. Premezclados**

En Guatemala este mortero es producido por industrias de concreto premezclado, los requerimientos de trabajabilidad, contenido de aire, retención de agua y resistencia a la compresión se solicitan de acuerdo con el tipo de mortero, según la clasificación presentada en la norma ASTM C-270.

Del mismo modo que el concreto premezclado, este mortero es dosificado y mezclado en una planta y llevado a la obra en un camión mezclador. El uso de aditivos para prolongar el tiempo de fraguado del mortero hasta por 72 horas es posible. El mortero premezclado tiene mejor control de calidad, mejor trabajabilidad y una resistencia a la compresión más uniforme. Las paredes

construidas con él experimentan menos penetración de agua que las hechas con mortero convencional mezclado en sitio.

#### **2.3.4.3. Predosificados**

Estos se diferencian de los anteriores porque vienen en sacos, tienen la ventaja de ahorrar tiempo en la mezcla homogénea de los agregados y los materiales aglomerantes. En otros casos, los materiales vienen en forma separada, deben mezclarse en seco y luego verter el agua. En la mayoría de los casos los fabricantes indican la cantidad de agua necesaria para obtener trabajabilidad, rendimiento y resistencia deseados.

#### **2.3.5. Mortero monocapa ultra liso**

El mortero monocapa ultra liso está diseñado para recubrimiento o acabados de paredes con textura lisa. Se fabrica industrialmente de la familia de mezclas listas y se suministra listo para mezclar con agua, aplicándolo directamente sobre paredes interiores o exteriores, con necesidad de una base previa de monocapa gris de un espesor de 3 mm y 24 horas. Después, se aplica el acabado final con el monocapa ultra liso con un espesor de 1 mm. Una vez aplicado al soporte y completo su fraguado, el mortero monocapa ultra liso cumple dos funciones importantes; por un lado, le confiere un aspecto definitivo de textura y color a la fachada de la pared, y al mismo tiempo lo protege frente a la acción de la intemperie dotándole de un acabado estético y perdurable.

Su formulación contiene cemento blanco, cal, mármol, fibra, además incorpora aditivos especiales, tales como retardante o acelerante, incorporador de aire, retenedor de agua, como muestra la figura 4.

Figura 4. **Componentes del monocapa ultra liso**



Fuente: Mixto Listo

El mortero monocapa ultra liso posee características positivas de homogeneidad y poder de retención de agua que lo hace más trabajable y fácil de aplicar que un mortero tradicional. Además, simplifica la preparación del soporte, ya que solo se necesita una pared limpia, libre de polvo y previamente humedecida. Dispone de un tiempo prolongado de aplicación que, por lo general, es de 45 minutos. Las superficies para su aplicación suelen ser muy variadas, entre ellas están paredes de block, paredes de concreto, paredes de ladrillo, losas tradicionales, losas prefabricadas, sobre monocapa gris y paredes de fibrocemento.

El mortero monocapa ultra liso (véase figura 5) es más elástico que los morteros tradicionales. Por ello, tiene menor tendencia a la fisuración y al cuarteamiento, también presenta mejor comportamiento frente al punzonamiento de cuerpos duros que, muchas veces, producen fisuras en los morteros tradicionales debido a su mayor rigidez. La baja densidad y un reducido módulo de elasticidad son características del mortero monocapa ultra liso que resultan ventajosas, proporcionan una adherencia inicial muy buena, no sobrecargan el

soporte, por lo cual se previene su desprendimiento. La baja permeabilidad del mortero frente al agua de lluvia se debe a la compacidad alcanzada, la cual es el resultado de una cuidada granulometría. Presenta, también, una buena permeabilidad al vapor de agua, lo que les permite efectuar normalmente los intercambios higrotérmicos entre el soporte y el ambiente exterior.

Figura 5. **Producto monocapa ultra liso**



Fuente: Mixto Listo.

#### **2.4. Procesos de Oxidación Avanzada (POAs)**

Los POAs se basan en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes. Muchas de estas técnicas pueden utilizarse para depurar agua, aire y suelos. El concepto

fue inicialmente establecido por Glaze y colaboradores en 1987<sup>12</sup>, quienes definieron los POAs como procesos que involucran la generación y uso de especies transitorias, como el radical hidroxilo ( $\text{HO}^\cdot$ ). Este radical puede ser generado por medios fotoquímicos (luz solar) o por otras formas de energía, poseen alta reactividad, con un alto potencial de oxidación de +2,8 V (frente al electrodo normal de hidrógeno), capaz de destruir efectivamente a los contaminantes compuestos orgánicos e inorgánicos.

Entre los diferentes POAs, la fotocatalisis heterogénea es el sistema que tiene mayor interés, ya que no necesita de la adición de reactivos químicos y puede emplear la radiación UV del sol. Este proceso se basa en la absorción directa o indirecta de energía radiante UV por un fotocatalizador, normalmente, un semiconductor de banda ancha como el  $\text{TiO}_2$ , para producir pares hueco-electrón con un extraordinario potencial oxidante, y por lo tanto capaces de mineralizar completamente contaminantes orgánicos presentes en el aire.

Los componentes necesarios para que la reacción de fotocatalisis tenga lugar son el compuesto por degradar, un compuesto oxidante como es el oxígeno contenido en el aire, un medio donde se produce la reacción, en este caso, el propio aire, un fotocatalizador como  $\text{TiO}_2$  u otro compuesto semiconductor y una fuente de luz UV ya sea natural o artificial.

#### **2.4.1. Ventajas de los POAs en tratamientos descontaminantes**

- Transforman químicamente la sustancia contaminante, ya que ésta es sometida a una fuerte oxidación química y no a un proceso de cambio de fase (arrastre, adsorción, etc.).

---

<sup>12</sup> W. H. Glaze. *Environmental Science and Technology*. p. 224-230

- El alto poder oxidante del radical  $\text{OH}^\cdot$ , permite la mineralización completa o casi completa de la mayoría de sustancias orgánicas.
- Pueden aplicarse a todo tipo de contaminantes, incluso aquellos que por su toxicidad y peligrosidad no pueden tratarse por técnicas convencionales.
- No generan residuos ni subproductos que necesiten a su vez nuevos tratamientos.
- Pueden tratar concentraciones mínimas de contaminantes.
- Disminución del consumo de recursos energéticos.

#### **2.4.2. Clasificación de los procesos de oxidación avanzados**

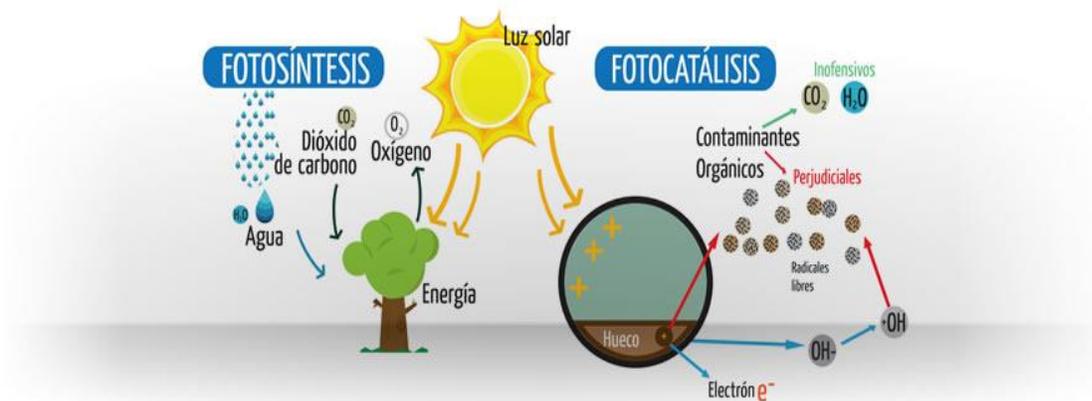
Existe una gran cantidad de POA's que pueden clasificarse en dos grupos principales en función del mecanismo de generación de los radicales  $\text{OH}^\cdot$  y de la utilización de agentes reactivos adicionales:

- Procesos no fotoquímicos. Implican la generación del radical  $\text{OH}^\cdot$  a través de cualquier vía que implique la utilización de especies químicas o de energía que no sea proporcionada por radiación luminosa. Alguno de los procesos que pertenecen a este grupo son la ozonización en medio alcalino o con peróxido de hidrógeno, procesos Fenton o la oxidación en agua sub/supercrítica.
- Procesos fotoquímicos. En estos procesos es necesaria la utilización de la luz, que puede desempeñar un doble papel dependiendo si causa la destrucción directa de los contaminantes, por ejemplo, la fotólisis, o si actúa como activador de los procesos de generación de radicales  $\text{OH}^\cdot$  y otras especies reactivas, en el que se incluye la fotocatalisis heterogénea.

## 2.5. Fotocatálisis

La fotocatálisis es la reacción que utiliza la luz para activar una sustancia. Se basa en la absorción directa o indirecta de energía radiante (visible o UV), en presencia de oxígeno. La sustancia será llamada catalizador ya aumenta el índice de una reacción reduciendo la energía de activación. En la naturaleza, el ejemplo más conocido de fotocatálisis es la fotosíntesis llevada a cabo por las plantas, donde la clorofila actúa como catalizador, inducida por la luz natural a convertir el agua y el dióxido de carbono en oxígeno, como se muestra en la figura 6.

Figura 6. **Comparación entre fotosíntesis y fotocatálisis**



Fuente: UNOI - Unidad de Orientación Empresarial en Innovación. *Mortero Fotocatalítico*.  
<http://enclave.cev.es/unoi/mortero-foto-catalitico/> Consulta: julio de 2017.

De esta forma, el término fotocatálisis fue definido por la IUPAC en 1988 como “*la aceleración de una reacción química por actuación de un catalizador sólido, activado mediante excitación electrónica al incidir sobre él radiación luminosa de un determinado contenido energético*”.<sup>13</sup> La radiación incidente pertenece a la región visible o UV del espectro electromagnético, y actúa como

<sup>13</sup> BRASLAVSKY, Silvia E. *Glossary of terms used in photochemistry*. p. 293-465.

activador o inductor de la reacción. El material que se utiliza como fotocatalizador es un semiconductor, el cual se caracteriza porque posee una estructura electrónica de bandas adecuada que le permite generar pares electrón/hueco al ser irradiado con luz de una longitud de onda adecuada. Estos, a su vez, favorecen la formación de otras especies altamente reactivas (radicales OH<sup>-</sup>, superóxidos), las cuales pueden desencadenar la reacción química deseada tal como la degradación de contaminantes.

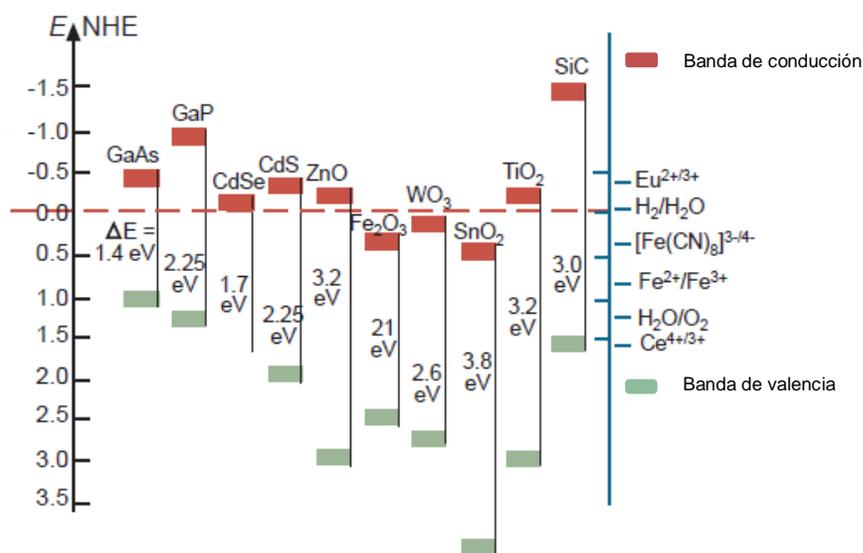
### **2.5.1. Fotocatálisis heterogénea**

La fotocatálisis heterogénea es uno de los POA's basados en la utilización de un semiconductor fotoquímicamente activo (fotocatalizador). Estos fotocatalizadores se caracterizan por su capacidad para adsorber simultáneamente dos reactantes, los cuales pueden ser reducidos y oxidados por una activación fotónica. La eficiencia de estos semiconductores que actúan como fotocatalizadores viene determinada, por la diferencia de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción. De esta forma, se define la banda de energía prohibida (*band gap*) como la cantidad de energía, expresada en eV, para que un electrón salte de la banda de valencia a la banda de conducción. La figura 7 muestra el *band gap* de diferentes semiconductores y algunos potenciales estándares de parejas redox. Las reacciones de destrucción de los contaminantes se producen en la región interfacial entre el sólido excitado y la solución.<sup>14</sup>

---

<sup>14</sup> E. Vigil, L. Saadoun, *Journal of materials science letters*. p.1067-1069.

Figura 7. **Posición de las bandas de conducción y de valencia de diferentes semiconductores en un pH 0**



Fuente: VELASCO, Leticia. *Materiales de carbono en fotocatalisis*. p. 2

### 2.5.2. Semiconductores y nanopartículas con propiedades fotocatalíticas

En los últimos años ha crecido el interés por la investigación en el avance de la síntesis y la funcionalidad de semiconductores y nanopartículas de metales con diferentes formas y tamaños. El tamaño y la forma dependiente de las propiedades ópticas y electrónicas de estas nanopartículas resulta interesante para explotarlas en las reacciones químicas inducidas con luz, como procesos de oxidación avanzada, donde las nanopartículas son empleadas normalmente como fotocatalizadores.

Los semiconductores constituyen una amplia clase de materiales cuya conductividad eléctrica aumenta con la temperatura y es significativamente menor que la de los metales. Los semiconductores de interés en fotocatalisis son sólidos (generalmente óxidos) donde los átomos constituyen una red

tridimensional. Existen diversos materiales con propiedades idóneas para actuar como catalizadores y llevar a cabo reacciones fotocatalíticas, por ejemplo, el arseniuro de galio (GaAs), fosfuro de galio (GaP), selenuro de cadmio (CdSe), sulfuro de cadmio (CdS), óxido de zinc (ZnO), óxido de tungsteno (WO<sub>3</sub>), óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) o carburo de silicio (SiC).<sup>15</sup> Estos materiales son económicamente accesibles, e incluso muchos de ellos participan en procesos químicos en la naturaleza. Además, la mayoría de estos materiales puede excitarse con luz de no muy alta energía, absorbiendo parte de la radiación del espectro solar que incide sobre la superficie terrestre (> 310 nm), lo cual incrementa el interés para un posible aprovechamiento de la luz solar.

Los fotocatalizadores más investigados hasta el momento son los óxidos metálicos semiconductores de banda ancha y, particularmente, el TiO<sub>2</sub>, el cual es el semiconductor más utilizado para aplicaciones medioambientales, porque muchos compuestos orgánicos tienen el potencial de oxidación por encima de la banda de valencia del TiO<sub>2</sub> y, por este motivo, pueden ser oxidados fotocatalíticamente por el TiO<sub>2</sub>. Así mismo, el potencial redox del par H<sub>2</sub>O/OH<sup>-</sup> se encuentra dentro del dominio del salto de banda del material. Otros motivos para la gran utilización del TiO<sub>2</sub> es su estabilidad química frente a los ácidos y a las bases fuertes, es químicamente inocuo y económico.

### **2.5.3. Semiconductor fotocatalítico**

Un semiconductor fotocatalítico debe ser química y biológicamente inerte, fotocatalíticamente estable, fácil de producir, eficientemente activado mediante radiación solar, barato y sin que cree riesgos medioambientales o humanos. El

---

<sup>15</sup> RODRÍGUEZ PÉREZ, Iván, et al. *Propuestas de funcionalidades avanzadas en un aplacado de fachada*. p.17.

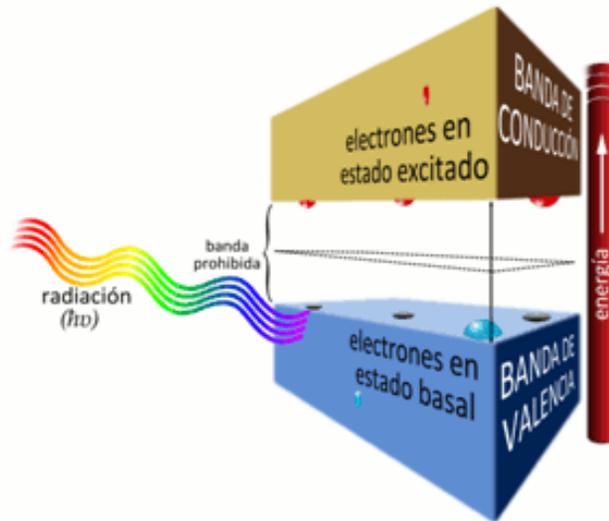
TiO<sub>2</sub> cumple todos estos aspectos, por lo que las estructuras cristalinas anatasa y rutilo de este semiconductor son utilizadas como fotocatalizadores bastante eficientes, aunque la fase anatasa presenta, por lo general, mejores rendimientos fotocatalíticos. Esta mayor eficiencia ha sido atribuida a que presenta un nivel de Fermi ligeramente más alto, más baja capacidad para adsorber oxígeno y mayor grado de hidroxilación. También existen algunos estudios en los que se indica que una mezcla de ambas fases, anatasa (70-75 %) y rutilo (30-25 %) es más activa que con solo la presencia de la fase anatasa.<sup>16</sup>

La capacidad de un semiconductor para llevar a cabo la transferencia de un electrón fotoinducido a una molécula adsorbida está controlada por la posición de la banda de energía del semiconductor y el potencial redox del adsorbato. El nivel de energía inferior de la banda de conducción se corresponde con el potencial de reducción de los electrones fotogenerados. El nivel de energía superior de la banda de valencia (véase figura 8) determina la capacidad de oxidación de los foto-huecos. Cada valor refleja la capacidad del sistema para promover reacciones de oxidación o reducción. El nivel del potencial de cada banda localiza la energía de ambos portadores de energía en la interfase entre el electrolito y el semiconductor, dependiendo de la naturaleza del material y del sistema en equilibrio.

---

<sup>16</sup> GARRIGA I CABO, Cristina. *Estrategias de optimización de procesos de descontaminación de efluentes acuosos y gaseosos mediante fotocátalisis heterogénea*. p.33.

Figura 8. Estructura de las bandas de un material semiconductor



Fuente: PRIETO Mahaney Orlando. *Estudio sobre las dependencias intrínsecas de las actividades fotocatalíticas sobre las propiedades estructurales y físicas de fotocatalizadores de óxido de titanio (IV)*. p.5.

#### 2.5.4. El catalizador en la fotocatalisis

El haz luminoso puede interactuar directa o indirectamente con el catalizador. Así se diferencian dos variantes en el proceso de activación de las reacciones:

- Reacción fotosensible: se produce cuando la energía radiante es absorbida por una especie química ligada al catalizador que, tras ser excitada, le comunica dicho estado al catalizador por transferencia de cargas o energía.
- Reacción fotocatalizada: la luz excita directamente al catalizador, y éste transfiere la carga o energía a otras especies adsorbidas en su superficie.

### 2.5.5. Parámetros que influyen en la actividad fotocatalítica

Varios parámetros que influyen en el proceso de oxidación de la fotocatalisis afectan la acción del fotocatalizador y, como consecuencia, resultan determinantes para la eficiencia global del proceso:

- Masa del catalizador: la velocidad de reacción inicial es directamente proporcional a la masa del catalizador; sin embargo, al llegar a cierto valor, la velocidad de reacción se vuelve independiente de su masa. Por lo tanto, la masa óptima del catalizador es aquella que evite un exceso del mismo y se asegure la absorción total de los fotones eficientes, es decir, la máxima cantidad de catalizador para la cual son iluminadas todas sus partículas.
- Longitud de onda: las variaciones de la velocidad de reacción en función de la longitud de onda siguen el espectro de absorción del catalizador, con un umbral correspondiente a su banda prohibida.
- Temperatura: debido a la activación fotónica, la fotocatalisis no requiere calor para su activación, puede operar a temperatura ambiente. Tanto la energía de activación real como la aparente son bajas en un intervalo de temperatura entre 20°C a 80°C. Para temperaturas más altas o más bajas el proceso pierde eficiencia.
- Presencia de oxígeno: el oxígeno es uno de los oxidantes más importantes. Diversos estudios han confirmado que la ausencia de O<sub>2</sub> en el medio de reacción conduce a la inactividad del catalizador.
- Área superficial: una elevada área superficial puede ser un factor determinante en ciertas reacciones fotocatalíticas dado que, a mayor cantidad de adsorbatos, más probabilidad existe de que sean atacados por los radicales. Sin embargo, catalizadores con alta área superficial, generalmente, contienen una gran cantidad de defectos en la red

cristalina, lo que favorece la recombinación de electrones y huecos dando lugar a una baja fotoactividad.

- Tamaño de la partícula: el camino predominante para la recombinación del par electrón/hueco puede ser diferente dependiendo del tamaño de partícula.
- Densidad de grupos hidroxilos superficiales: los grupos hidroxilos superficiales participan directamente en la formación de los radicales  $\text{OH}^\cdot$  mediante su reacción con los huecos y porque actúan también como centros de adsorción de los compuestos orgánicos.

La elección del catalizador más conveniente debe tener en cuenta también otros aspectos como su estabilidad química y a la fotocorrosión, disponibilidad y costo en el mercado, así como el grado de toxicidad.

## 2.6. Dióxido de titanio

El dióxido de titanio  $\text{TiO}_2$  está en la naturaleza en varias formas, presenta tres formas polimórficas a presión atmosférica: rutilo (tetragonal), brookita (ortorrómbico), anatasa (tetragonal).<sup>17</sup> Es característica de este elemento su coloración blanca. Por este motivo, se utiliza en la industria como pigmento. Rutilo es la única fase estable, mientras que anatasa y brookita son metaestables y se transforman a rutilo irreversiblemente por calentamiento. La temperatura de conversión es la variable en función de las condiciones de fabricación de cada uno de los materiales. Todas estas fases se encuentran en la naturaleza y forman monocristales, mientras que los procesos industriales empleados en la producción de  $\text{TiO}_2$  dan como producto anatasa, rutilo o una mezcla de ambas fases. Como muchas aplicaciones requieren, preferentemente, una fase. La

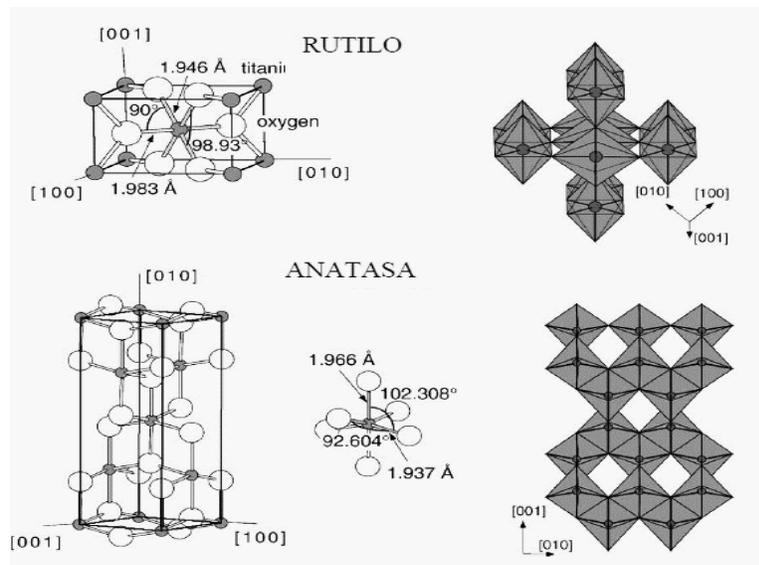
---

<sup>17</sup> QUIROZ GAITÁN, Heiddy Paola, et al. *Preparación y estudio de las propiedades estructurales, ópticas y morfológicas de nanotubos de  $\text{TiO}_2$  para su aplicación en sensores ópticos*. p. 15.

transformación anatasa-rutilo es de gran interés para diversas industrias (pinturas, cerámicos, electrónica). Como consecuencia, de las diferencias en sus estructuras de red, el rutilo y la anatasa tienen densidades de masa y estructuras de banda electrónica diferentes y dan lugar a diferentes *band gaps* (de 3,2 eV para la anatasa y 3,02 eV para el rutilo). De esta forma, el umbral de absorción de las fases anatasa y rutilo del  $\text{TiO}_2$  para muestras bien cristalizadas corresponde a 384 y 410 nm, respectivamente.<sup>16</sup>

La estructura del  $\text{TiO}_2$  parte de la coordinación octaédrica del Ti que se encuentra rodeado de seis átomos de  $\text{O}_2$ . Estos, a su vez, están unidos a tres átomos de Ti con una configuración trigonal. Dependiendo de cómo se establezcan las uniones entre los octaedros unitarios, aparecen las cuatro modificaciones cristalinas mencionadas. De este modo, la anatasa y el rutilo cristalizan en el sistema tetragonal mientras que la brookita lo hace en el rómbico, las estructuras se pueden observar en la figura 9.

Figura 9. **Estructuras de anatasa y el rutilo del  $\text{TiO}_2$ .**



Fuente: GARRIGA, Cristina. *Estrategias de optimización de procesos de descontaminación de efluentes acuosos y gaseosos mediante fotocatalisis heterogénea*. p.31.

El dióxido de titanio es capaz de producir pares electrón-hueco por absorción de luz en el ultravioleta cercano (UVA), con longitudes de onda menores de 387 nm. Se favorecen así las reacciones de óxido-reducción de compuestos orgánicos adsorbidos en la superficie del óxido. En fase gaseosa, los sustratos orgánicos pueden captar por sí mismos los huecos fotogenerados, ya que el número de moléculas de agua adsorbidas sobre el catalizador es mucho menor. Aunque en presencia de vapor de agua siempre existirán grupos OH<sup>-</sup> en la superficie de TiO<sub>2</sub>, y su contribución a la fotooxidación no será despreciable, la adsorción de los compuestos orgánicos en fase gas es un prerrequisito fundamental para la obtención de un eficiente proceso de mineralización.

Ensayos realizados con partículas de diferente tamaño indican que la estabilidad relativa de cada fase puede invertirse cuando el tamaño de partícula disminuye a un valor suficientemente bajo debido a efectos superficie-energía (energía libre superficial y presión superficial). Así, se ha determinado que si el tamaño de partícula de las fases anatasa, rutilo y brookita son iguales, la fase anatasa es termodinámicamente más estable en tamaños de partícula menores de 11 nm, brookita es más estable entre 11 y 35 nm y rutilo más estable en tamaños mayores de 35 nm. La entalpía de transformación de la fase anatasa a rutilo es baja. Cinéticamente, la fase anatasa es estable y su transformación a temperatura ambiente es tan lenta que la transformación prácticamente no ocurre. A escala macroscópica, la transformación alcanza una velocidad importante a temperaturas mayores a 600°C.<sup>18</sup>

---

<sup>18</sup> GARCIA, Lisboa; ESPIGA, Lucia. *Materiales fotocatalíticos y sus aplicaciones en construcción*. p.31.

### 2.6.1. Producción de dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>)

Las materias primas empleadas en la producción comercial de TiO<sub>2</sub> son ilmenita, rutilo, rutilo sintético (a partir de la ilmenita), leucoxeno y anatasa natural. Dos de los procedimientos más utilizados para la producción comercial de TiO<sub>2</sub> son:

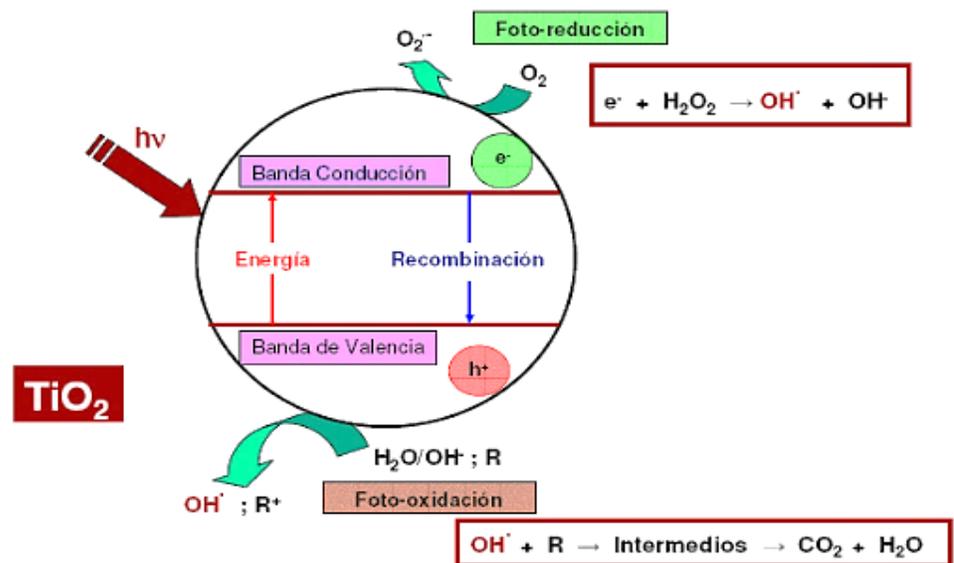
- Proceso sulfatado. Se lleva a cabo la digestión de las fuentes de TiO<sub>2</sub> con ácido sulfúrico concentrado a una temperatura comprendida entre 150-220°C. Como producto, se obtienen sulfatos de titanio que son hidrolizados o precipitados por vía húmeda. El producto obtenido es posteriormente purificado y calcinado para generar el TiO<sub>2</sub> final.
- Proceso clorado. En una primera etapa las materias primas de TiO<sub>2</sub> son transformadas a TiCl<sub>4</sub> por cloración a 700-1200 °C y purificadas por destilación. Posteriormente, las partículas de TiCl<sub>4</sub> son oxidadas con O<sub>2</sub> en fase vapor, en un reactor de llama o tubo de sílice, a una temperatura de 900-1400 °C.

Los materiales que se obtienen en llama tienen el rutilo como estructura cristalina predominante, mientras que, por vía húmeda a temperatura ambiente, se genera principalmente TiO<sub>2</sub> amorfo o en la fase anatasa. Dado el mayor uso actual del TiO<sub>2</sub> como pigmento y aditivo, el método del cloro es el de mayor expansión. En cambio, el método del sulfato proporciona características mucho más interesantes desde el punto de vista de la fotocatalisis, como son un mejor control de la porosidad del sólido y de la concentración de dopantes incorporados.

## 2.6.2. Mecanismo de fotocatalisis del dióxido de titanio

Cuando el  $\text{TiO}_2$  absorbe la radiación UV de la luz solar o de una fuente de luz iluminada (lámparas fluorescentes), produce pares de electrones y huecos. El electrón de la banda de la valencia del  $\text{TiO}_2$  llega a ser excitado al ser iluminado por la luz. El exceso de la energía de este electrón excitado promueve el electrón a la banda de conducción del  $\text{TiO}_2$  y, por lo tanto, crea pares negativo-electrón ( $e^-$ ) y del positivo-hueco ( $h^+$ ). El hueco positivo del  $\text{TiO}_2$  rompe la molécula de agua formando hidrógeno y radical  $\text{OH}^\cdot$ . El electrón negativo reacciona con la molécula del oxígeno formando una súper oxidación. Este ciclo continúa mientras la luz esté disponible. En la figura 10 se presenta esquemáticamente los procesos que tienen lugar sobre una partícula de  $\text{TiO}_2$  al ser irradiada con radiación de adecuada longitud de onda.

Figura 10. Etapas del proceso fotocatalítico



Fuente: SÁNCHEZ, Hoover Albeiro. *Degradación de resorcinol por fotocatalisis heterogénea usando  $\text{TiO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$* . p.195.

## **2.7. Siliconas**

La silicona, un polímero sintético, derivado del polisiloxano está compuesta por una combinación química de silicio-oxígeno-silicio (Si-O-Si). La misma es un derivado de la roca cuarzo o arena. Las características más relevantes de las siliconas son: impermeabilidad al agua, mínima influencia sobre el color de los materiales, estabilidad frente a los agentes extremos atmosféricos, etc. A su vez, influyen sobre las propiedades físicas y microestructurales de los substratos, como el ángulo de contacto del agua con la superficie del material, variación de color, coeficiente de capilaridad, etc.

Por otro lado, la aplicación de los productos hidrofugantes a base de silicona les confieren a los materiales tratados, una mayor resistencia a los agentes agresivos. Las siliconas usadas habitualmente contienen cadenas alquil cortas, que actúan como agente hidrófobo en la superficie de los materiales. La estructura porosa de los materiales de construcción a base de cemento Portland es altamente sensible a la absorción capilar de agua. Los polidimetilsiloxanos o PDMS son los siloxanos más utilizados.

### **2.7.1. Polidimetilsiloxano (PDMS)**

Es un polímero que se obtiene por medios químicos a través del silicio. Están disponibles como fluidos de baja o alta viscosidad, poseen terminaciones de grupos silanol que son reactivos. Su baja tensión superficial, capacidad para reaccionar con material cementoso, buena resistencia a la radiación ultravioleta y la alta permeabilidad al gas benefician los tratamientos hidrófobos. El polidimetilsiloxano, es un agente reductor barato, fácil de manejar y sustentable con el medio ambiente.

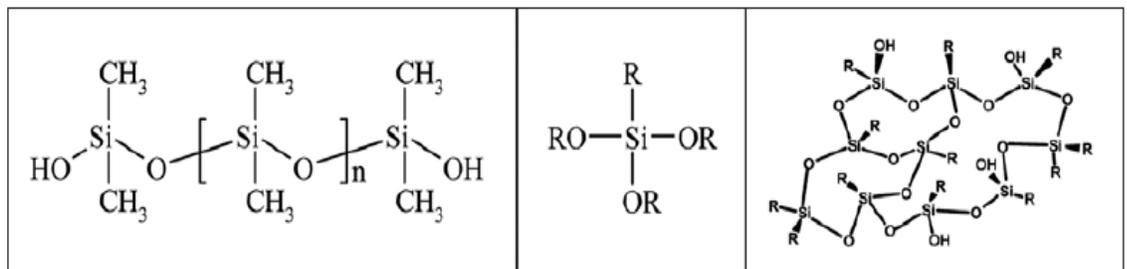
### 2.7.2. Silanos

Los silanos son moléculas basadas en un átomo de silicio que tienen cuatro sustituyentes. Un silano muy utilizado, es el alquil-trialcoxi-silano. Se utiliza en aditivos hidrófobos, ya sea para el post-tratamiento o mezclas, ya que tiene buena reactividad hacia compuestos inorgánicos y son ricos en silanol. La cadena alifática (es decir, isobutilo u octilo) le confiere el carácter hidrófobo al sustrato tratado. Por hidrólisis y condensación, los silanos crean una red resinosa que enlaza covalentemente a la superficie de los materiales tratados, y le confieren resistencia al agua y una buena durabilidad.

### 2.7.3. Resinas de silicona

Las resinas de silicona se obtienen mediante una secuencia de reacciones de hidrólisis y condensación de mezclas de silanos. Las resinas de silicona con grupos alcoxi y grupos alquilo hidrofóbicos pueden diseñarse para su difusión dentro de una matriz de cemento y reaccionar con la superficie de los poros, la reacción conduce a su anclaje químico a los materiales tratados. La figura 11 ejemplifica la estructura de estos compuestos.

Figura 11. **Estructura del polidimetilsiloxano, alquil-trialcoxi-silano y representación esquemática de una resina de silicona**



Fuente: LECOMTE, Jean-Paul. *Mortar protection. New silicone resin-based hydrophobic powder for the dry mix market.* p. 88.

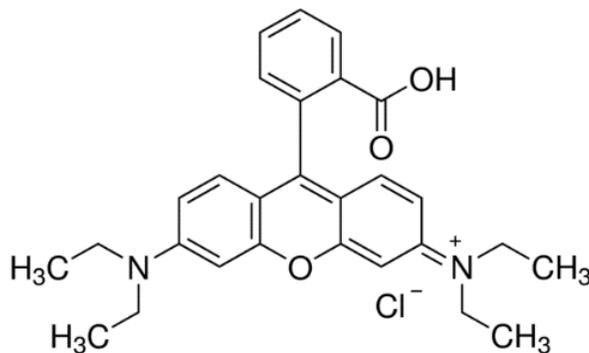
## 2.8. Rodamina B

Es una clase de colorante de xanteno con una masa molecular de 479,01 g/mol. Este compuesto químico exhibe un fuerte color violeta magenta. La rodamina posee fluorescencia y puede detectarse fácilmente y a un costo bajo mediante fluorómetros.

La degradación de la rodamina B indica la actividad fotocatalítica de los materiales y puede ser seguida por medio de espectrofotometría o espectroscopia ya que es relativamente estable bajo iluminación de rayos UV, con mayor resistencia a los rayos UV, entre los otros colorantes utilizados en los análisis experimentales de fotocatalisis.

Este colorante se emplea, principalmente por ser soluble en el agua y presentar baja sensibilidad a la alcalinidad del cemento. Adicionalmente, como se observa en la figura 12, la Rodamina B presenta un antraceno e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) en su estructura química. Por ello, se parece a diversos contaminantes altamente nocivos encontrados en las grandes ciudades.

Figura 12. Estructura química de la Rodamina B ( $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$ )



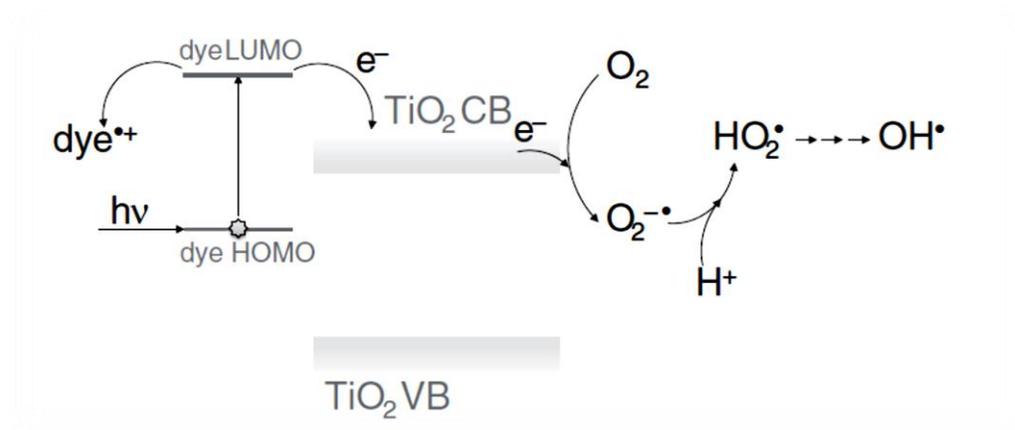
Fuente: CARDENAS, Carolina. *Evaluación de las propiedades físicas y fotocatalíticas de cemento adicionado con nanopartículas de dióxido de titanio*. p.55.

### 2.8.1. Mecanismo de degradación de la Rodamina B

La decoloración de la rodamina B en presencia de  $\text{TiO}_2$  implica no solo fotocatalisis (fotorreacción sensibilizada a  $\text{TiO}_2$ ) sino también una fotólisis directa del colorante (fotorreacción sensibilizada por colorante). En el primer mecanismo, la luz activa el  $\text{TiO}_2$  mediante la promoción de electrones desde la banda de valencia a la banda de conducción. El agua adsorbida y el oxígeno desempeñan un papel fundamental, ya que reaccionan con orificios positivos de banda de valencia y electrones de banda de conductancia, respectivamente, para generar radicales  $\text{OH}^\cdot$ , responsables de la mineralización de la Rodamina B adsorbida sobre el  $\text{TiO}_2$ .

En el segundo mecanismo la molécula orgánica absorbe los fotones de luz visible que solo pueden promover los electrones desde el orbital molecular más alto ocupado (HOMO) hasta el orbital molecular más bajo desocupado (LUMO) en la molécula orgánica. Esto ocurre cuando la energía del fotón es insuficiente para inducir la fotoactivación de  $\text{TiO}_2$  (banda gap en el UV cercano). Estos electrones se inyectan adicionalmente desde la rodamina B, LUMO a la banda de conducción del  $\text{TiO}_2$  y dan lugar a la formación de radicales de iones moleculares  $\text{RhB}^{+\cdot}$  en la superficie de  $\text{TiO}_2$  (véase figura 13). La transferencia del electrón de la banda de conducción al oxígeno adsorbido sobre la superficie del  $\text{TiO}_2$  produce  $\text{O}^{2\cdot-}$ . Las especies que surgen de este proceso son altamente reactivas y conducen a la mineralización de la molécula orgánica.

Figura 13. **Sistema RhB-TiO<sub>2</sub> bajo irradiación UV - fotorreacción sensibilizada por colorante**



Fuente: ASLAN. *Evaluation of test methodologies and self-cleaning performances of TiO<sub>2</sub> containing construction materials*. p. 31.

## 2.9. Hidrofobicidad

La hidrofobicidad de un material se define como la capacidad del material para repeler el agua y depende de la composición química de la superficie y la geometría de la superficie. El efecto hidrófobo se origina a partir de la ruptura de los enlaces de hidrógeno altamente dinámicos entre moléculas de agua líquida.

El ángulo de contacto entre una gota de agua y la superficie se utiliza generalmente como un indicador de hidrofobicidad o humectabilidad. Una superficie es hidrofóbica si tiende a no adsorber agua y cuando muestra ángulos de contacto con el agua (en forma de gotas) de 90° hasta 120°, aproximadamente, mientras que un ángulo de contacto de menos de 90° indica hidrofiliidad, que es la tendencia de una superficie a ser húmedo o para absorber el agua. Se dice que un material es superhidrofóbico cuando el ángulo de

contacto es superior a  $150^\circ$ .<sup>19</sup> El ángulo de contacto del agua con un sólido superficie se puede medir por goniómetro o tensiómetro por el método de la gota sésil. Para mejor visualización de los tipos de ángulos de contacto se puede observar la figura 14.

Figura 14. **Ángulos de contacto sobre superficies**



Fuente: CeNano Latinoamérica. [www.cenano-la.com/angulo-de-contacto.html](http://www.cenano-la.com/angulo-de-contacto.html). Consulta: septiembre de 2016.

## 2.10. Efecto loto

La hoja de la flor de loto (*Nelumbo Nucifera*) es considerada símbolo de pureza y está relacionada con la divinidad en diferentes culturas asiáticas por su permanente estado de limpieza y tersura. La superficie de la hoja posee propiedades que posibilitan ese estado en ambientes húmedos y pantanosos.<sup>20</sup> La forma cómo interactúan el agua y la superficie en las hojas permite que una gota se desplace con mucha facilidad y que, en su movimiento, arrastre las partículas que se encuentran en la superficie. Las hojas de la flor de loto presentan una superficie rugosa, con nanocristales de cera, que confieren a esta planta un efecto superhidrofóbico (de repelencia al agua), puesto que las gotas de agua no se esparcen en su superficie, lo que además la mantiene limpia.

<sup>19</sup> GUO, X. L., et al. *Developments of bionic polymers*. p. 1023-1029.

<sup>20</sup> FERNÁNDEZ CAÑETE, Agustín, et al. *Estudio de la hidrofobicidad y autolimpieza en materiales con nanotratamientos superficiales*. p.6.

No sólo su belleza hizo famosa a la flor de loto, sino también la propiedad que tienen sus hojas de limpiarse a sí mismas. En efecto, esta planta acuática, a pesar de vivir rodeada de fango, tiene sus hojas siempre brillantes debido a las moléculas hidrofóbicas de la epidermis, que se compone de unas papilas pequeñísimas, de 10 a 20 nm de ancho, recubiertas por una capa hidrofóbica. De este modo, las gotas de agua que caen sobre ellas, al ser repelidas, tienden a minimizar su superficie de contacto y alcanzan una forma esférica. En consecuencia, las gotas redondas arrastran las partículas de suciedad y las barren de la superficie. Esta autolimpieza es importante para la planta pues la mantiene libre de patógenos, además de conservar su capacidad de fotosíntesis al mantener libre la superficie expuesta a la luz. La figura 15 muestra cómo se observa el efecto loto en la naturaleza.

Figura 15. **Comparación del efecto loto**



Fuente: FERNÁNDEZ, Agustín. *Estudio de la hidrofobicidad y autolimpieza en materiales con nanotratamientos superficiales*. p.6.

### **2.11. Propiedades de autolimpieza**

El efecto de autolimpieza es una consecuencia de la degradación fotocatalítica de los depósitos que se acumulan en la superficie y el posterior lavado de los productos de reacción por el agua en contacto con la capa superficial hidroxilada. A través de la propiedad de la autolimpieza, los contaminantes de la superficie son en parte fotomineralizados, y después las

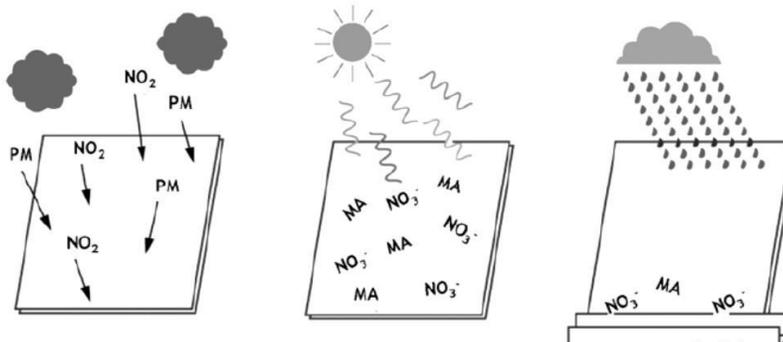
partículas, que son poco adherentes, son eliminadas de la superficie por el agua que está en contacto directo con la superficie. Además, se pueden evitar manchas en la superficie debido a la formación de gotas causadas por la evaporación lenta del agua.

Las propiedades de autolimpieza pueden darse por dos tipos de tratamientos: hidrofóbico e hidrofílico. Los tratamientos hidrófobos persiguen simular el efecto loto, el agua formará gotas en las que en los depósitos serán atrapadas y eliminadas de la superficie. Por otro lado, los tratamientos hidrofílicos poseen la propiedad de extender el agua por la superficie, provocando, así, un mayor arrastre de la materia orgánica descompuesta por la fotocatalisis.

En las fachadas de edificios, la suciedad provoca manchas y cambios de color que pueden originarse por la deposición de partículas orgánicas y minerales, la acumulación de cenizas volantes, hidrocarburos y hollín por la combustión de combustibles fósiles y biomasa, así como el crecimiento biológico.

Los tratamientos hidrófobos suelen realizarse con nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ , por lo que existe un combinado de efectos de autolimpieza con fotocatalisis. La principal ventaja de la capacidad de autolimpieza del  $\text{TiO}_2$  es su economía, ya que solo se requiere luz solar y lluvia como fuerzas motrices. Su aplicación podría reducir la necesidad de mantenimiento, particularmente, en edificios altos donde puede ser muy difícil y costoso.

Figura 16. **Representación esquemática del efecto de autolimpieza en superficies adicionadas con  $\text{TiO}_2$**



Fuente: ASLAN. *Evaluation of test methodologies and self-cleaning performances of  $\text{TiO}_2$  containing construction materials*. 2014. p.22.

## 2.12. Interacciones entre matriz de cemento y nanopartículas de $\text{TiO}_2$

Existen interacciones entre nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  con materiales cementosos, dadas usualmente con la adición de nanopartículas o suspensiones de  $\text{TiO}_2$ , de tamaño de partícula variable, para cementar pastas, yesos, morteros y concretos, caracterizados, generalmente, por una baja relación agua-cemento. Se ha descubierto que el propio  $\text{TiO}_2$  puede conducir a cambios en las características del material, como los procesos de resistencia mecánica y envejecimiento.

El estado fresco se debe a la adición de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  al mortero o al concreto que causa una disminución en la trabajabilidad debido a su alta superficie, lo que incrementa la cantidad de agua adsorbida y modifica el comportamiento reológico de la mezcla aumentando la viscosidad. Un rápido consumo de agua indica que las reacciones de hidratación se aceleran. Como resultado, la dosificación de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  en pastas de cemento tiene un impacto en la solidificación, causando una disminución en el tiempo de fraguado. El  $\text{TiO}_2$  en materiales cementosos también modifica la distribución del

tamaño del poro y el volumen total del poro. Las nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  son un relleno eficaz de vacíos debido a su tamaño nanométrico, y tiende a llenar el espacio de poros a su alrededor, gradualmente, dando como resultado una reducción del volumen de poros. Paralelamente, el contenido de agua debe aumentar con la cantidad creciente de nanopartículas para asegurar una trabajabilidad adecuada. Esto contribuye a una mayor porosidad; por lo tanto, hay un efecto conjunto de reducción del tamaño de poro y mayor porosidad en composiciones con altas cantidades de  $\text{TiO}_2$ .

En el caso del concreto endurecido, hay una mejora en la resistencia a la compresión, debido al efecto de relleno de las nanopartículas, el  $\text{TiO}_2$  es un nanorelleno no reactivo y el aumento de la resistencia mecánica puede atribuirse a su amplia superficie para la nucleación o aferrarse de productos de hidratación, a pesar de su acción de llenado que es probable que dependa de una dispersión no uniforme de nanopartículas o de su aglomeración. Además, se producen algunos cambios en la microestructura del concreto y mortero, durante la vida útil de la estructura. Debido a las reacciones de descomposición fotocatalíticas, el uso de mezclas orgánicas en el concreto que contiene  $\text{TiO}_2$  y otros materiales cementosos, puede resultar en la degradación del componente orgánico con una posible reducción de los resultados desde el punto de vista de durabilidad y fotoactividad.

El rendimiento de la fotocatalisis en aplicaciones urbanas puede verse afectado por factores medioambientales, como la intensidad de la radiación incidente, humedad relativa, temperatura y viento, pero también depende de otros factores intrínsecos del fotocatalizador, cuando está asociado a un soporte a base de cemento, como porosidad, tipo y tamaño de los agregados, método de aplicación, cantidad aplicada y envejecimiento.

## **2.13. Técnicas instrumentales**

### **2.13.1. Difracción de rayos X (XRD)**

Esta técnica se basa en el fenómeno de la difracción de Rayos X. Consiste básicamente en un proceso de interferencias constructivas de ondas de rayos X que se produce en determinadas direcciones de espacio y permite obtener información cristalográfica de un material normalmente en forma de polvo. Con la difracción de rayos X (XRD) se identifican y caracterizan, cuantitativa y cualitativamente, las fases cristalinas en una muestra. En este sentido, la disposición tridimensional ordenada de los átomos de un cristal da lugar a unas distancias periódicas entre sus átomos. Por medio de este ordenamiento, el cristal actúa como una red de difracción de una radiación electromagnética de longitud de onda del mismo orden que la distancia entre los átomos del cristal.

La interacción de los rayos X con la materia en estado cristalino produce patrones de difracción, de los que puede extraerse información sobre la estructura cristalina, y tamaño de partículas. Los rayos X son una radiación electromagnética de onda corta, producida por la aceleración de electrones de elevada energía, o por transiciones electrónicas, provocadas por electrones internos en los átomos. La interacción entre la radiación y los electrones de la materia da lugar a una dispersión, cuando los rayos X son dispersados por un cristal, hay interferencia entre los rayos dispersados y en consecuencia, ocurre el fenómeno de difracción.

La difracción se produce cuando al incidir un haz de rayos X sobre un conjunto de planos atómicos paralelos, las ondas reflejadas procedentes de los distintos planos interfieren entre sí, como se muestra en la figura 17. De este modo, la Ley de Bragg relaciona la distancia entre dos planos atómicos sucesivos

en un cristal y el ángulo de dispersión de la radiación que genera interferencia constructiva (condición de difracción) por medio de la ecuación 1:

$$2 * d * \text{sen}(\theta) = n * \lambda \quad \text{[Ecuación 1]}$$

El difractograma de un cristal consiste en líneas o picos de difracción a distintos valores de  $2\theta$  que corresponde a los espaciados de cada una de las familias de planos de la muestra. Las líneas de difracción constituyen un patrón específico para cada estructura cristalina y permite, por lo tanto, identificar cada sustancia de acuerdo con un patrón de difracción de referencia, recogidos en distintas bases de datos como la perteneciente al *International Centre for Diffraction Data* (ICDD). Por ello, también es posible identificar muestras polifásicas a partir de la confrontación del difractograma con los patrones existentes de las fases cristalinas puras.<sup>21</sup>

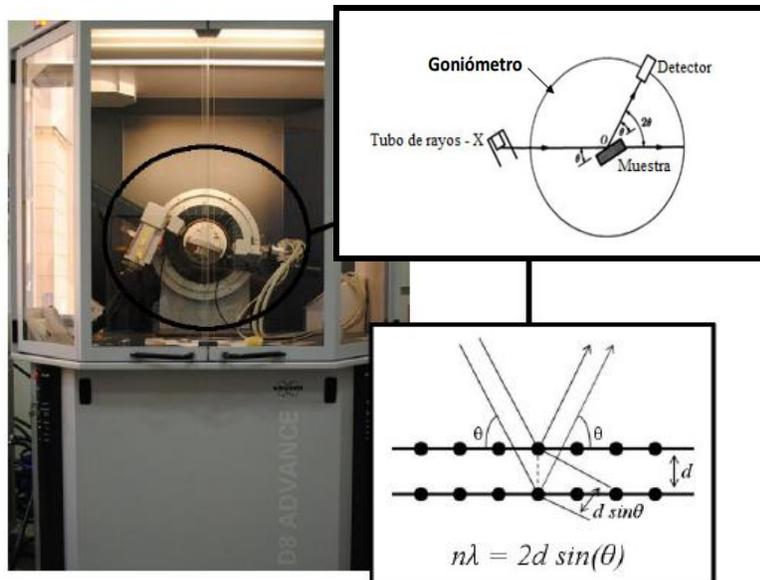
Por otro lado, por medio de la difracción de rayos X se estima el dominio del tamaño del dominio cristalino. Cuando el tamaño de cristal es muy pequeño (orden nanométrico) los picos de un difractograma se ensanchan, y a medida que el cristal aumenta de tamaño, se produce un estrechamiento paulatino de los picos del difractograma. La ecuación de Scherrer permite estimar las dimensiones del de cristal de acuerdo con la ecuación 2:

$$B = \frac{K * \lambda}{\beta * \cos(\theta)} \quad \text{[Ecuación 2]}$$

---

<sup>21</sup> OLLEROS, Jaime Carbajo. *Aplicación de la fotocatalisis solar a la degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa con catalizadores nanoestructurados de tio2*. p.72.

Figura 17. **Difractómetro de rayos X**



Fuente: ROMANI. *Graphene Oxide as a cement reinforcing additive*. p.64.

### 2.13.1.1. Método de polvo cristalino o método de polvo y muestra

Este método es la técnica de difracción que se puede aplicar para determinar la composición de los elementos cristalinos en un material que no puede ser analizado a partir de un único cristal. Se basa en la utilización de una radiación monocromática y en la desorientación de los cristales que forman la mezcla, obteniéndose un espectro que refleja las distintas fases cristalinas que la componen y su orientación preferente. Dentro de esta técnica hay dos métodos: la cámara de polvo o difractómetro de polvo (véase figura 17).

En el método del difractómetro de polvo se obtiene un registro gráfico de las señales que se producen en distintos detectores electrónicos de radiación las reflexiones. Y en este caso es más precisa la medida de las intensidades. Además, las reflexiones se producen preferentemente en los elementos más superficiales, el tiempo de registro es pequeño y la muestra tiene que ser

sometida a un proceso de alisamiento superficial para evitar irregularidades que impidan las condiciones de focalización que deben producirse. Estas condiciones favorecen la existencia de orientaciones preferenciales de los cristales que forman la muestra en la zona superficial. Para disminuir estos factores la única solución posible es reducir el tamaño de los cristales lo máximo posible.

## **2.13.2. Análisis térmico**

### **2.13.2.1. Termogravimetría (TGA)**

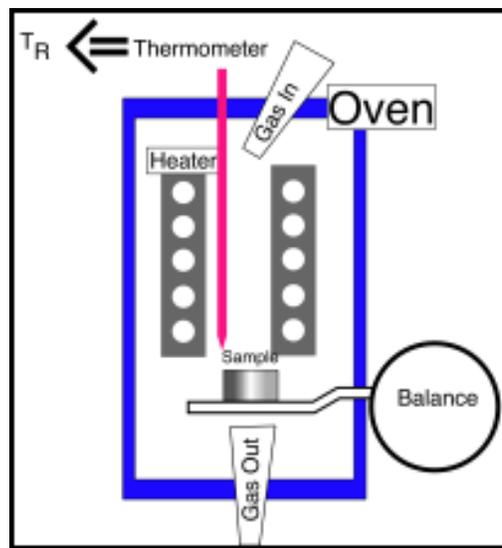
El análisis termogravimétrico es una técnica que mide la variación de masa en un compuesto en función de la temperatura. Las variaciones de temperatura no siempre implican un cambio en la masa de la muestra. Existen, sin embargo, cambios térmicos que sí se acompañan de un cambio de masa, como la descomposición, la sublimación, la reducción, la deserción, la absorción y la vaporización.

El fundamento de la técnica consiste en someter una muestra, previamente pesada, a una rampa de calefacción controlada bajo atmósfera oxidante, registrando simultáneamente la evolución del peso con la temperatura. A partir de las pérdidas de peso obtenidas, y sus temperaturas correspondientes a los distintos máximos presentes en la curva diferencial, se conocen las etapas producidas a lo largo de la descomposición térmica, así como las cantidades eliminadas en las etapas.

El análisis TGA es básicamente un micro-equilibrio dentro de un horno de tubo pequeño, como se muestra en la figura 18. Se coloca una muestra en el horno y se eleva la temperatura. A medida que la muestra se evapora, reacciona o se quema dentro de la cámara, la masa se determina, hasta el microgramo más

próximo. Cuando una muestra se evapora, la temperatura de la muestra se hace constante. Esto significa que la temperatura en el horno es ligeramente más constante si la muestra se quema. El calor extra liberado se puede medir en el horno, si la velocidad de calentamiento no es demasiado rápida.

Figura 18. **Análisis esquemático del principio de funcionamiento TGA**



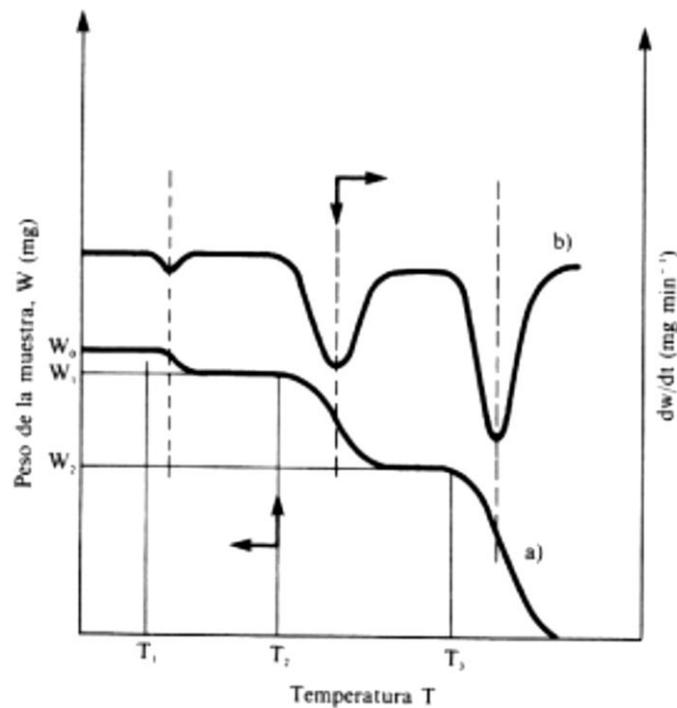
Fuente: ADALSTEINSSON, T. *Principles for Thermogravimetric Analysis (TGA)*.  
<http://webpages.scu.edu/ftp/adalsteinsson/GroupSite/Methods/DSCinfo/page30/page30.html>  
Consulta: julio de 2017.

El aparato necesario para realizar un análisis termogravimétrico incluye una balanza analítica sensible, un horno, un mecanismo para controlar y programar la temperatura del horno y un registrador que proporcione una gráfica de la masa de la muestra en función de la temperatura. A menudo, se necesita equipo auxiliar para proporcionar una atmósfera inerte alrededor de la muestra.

### 2.13.2.2. Termogramas

La representación de la masa o del porcentaje de masa en función del tiempo o de la temperatura se denomina termograma. Además, el registro de la derivada matemática de la pérdida de masa en función de la temperatura se denomina curva derivada del termograma. En la figura 19 se representan estos dos tipos de termograma, el convencional y su derivada. Un termograma proporciona información tanto cuantitativa como cualitativa.

Figura 19. Termograma y curva derivada



Fuente: SKOOG, Douglas. *Principios de análisis instrumental*. p 868.

### 2.13.3. Colorimetría

La ciencia que estudia el color se llama colorimetría. El espacio de color es un método de expresión del color de un objeto o de una fuente de luz usando algún tipo de notación. Las tres dimensiones del color son:

- Tonalidad: son los colores del lenguaje humano (rojo, azul, verde...)
- Claridad: los colores pueden ser más o menos claros
- Saturación: indica la intensidad de un color

Con estos tres parámetros se define el color. Los sistemas para definirlo varían en la forma de especificar los parámetros. La idea de la medición de modelos del color surge para facilitar la especificación de objetos en colores de una forma estándar. Entre ellos se pueden destacar los siguientes:

#### 2.13.3.1. Sistemas triestímulo (XYZ)

Este sistema pertenece a los sistemas CIE que son los determinados por la Comisión Internacional de L'Éclairage. El triestímulo se desarrolló en 1931, y se basa en la definición de tres colores primarios:

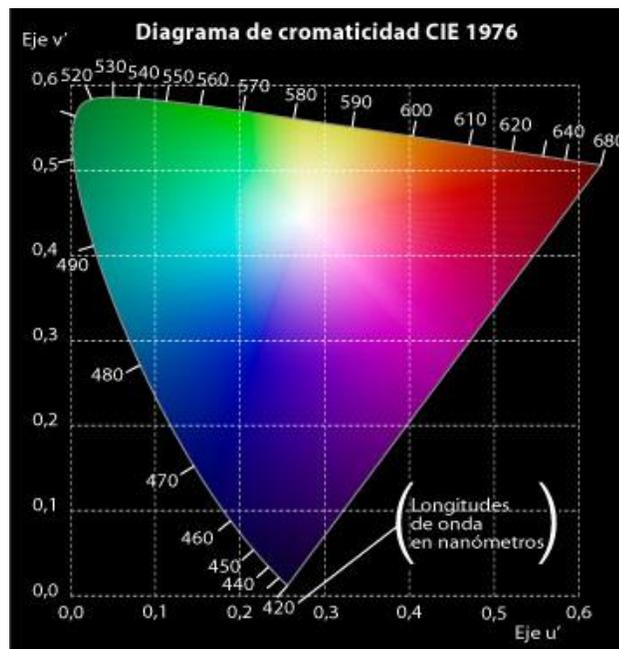
- R (rojo):  $\lambda=700,0$  nm
- G (verde):  $\lambda =546,1$  nm
- B (azul):  $\lambda =435,8$  nm

El sistema colorimétrico XYZ permite representar colores según su cromatismo (ejes X e Y) y su luminancia (eje Y).

### 2.13.3.2. Sistema CIEL\*a\*b\* (1976)

La gama de un dispositivo de visualización por lo general se representa al trazar en el diagrama cromático (véase figura 20) un polígono que contenga todos los colores que el dispositivo sea capaz de producir. Sin embargo, el sistema XYZ y los diagramas de cromaticidad asociados no son perceptualmente uniformes. Este problema dificulta el cálculo de las diferencias entre dos estímulos de color. La necesidad de un espacio de color uniforme condujo a la transformación de una serie de transformaciones no lineales del espacio CIE triestímulo XYZ 1931 que concluyeron en la especificación concreta de una de estas transformaciones en lo que se conoce como espacio de color CIE 1976 ( $L^*a^*b^*$ ).

Figura 20. Diagrama de cromaticidad CIE

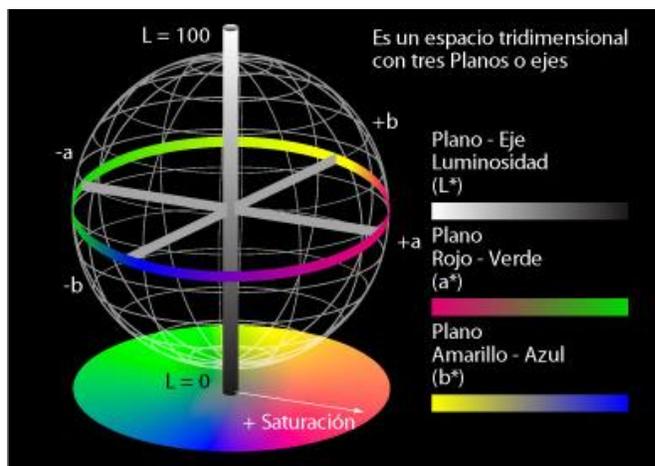


Fuente: WESTLAND, S. *Diagramas de cromaticidad*.

[http://www.gusgsm.com/espacio\\_color\\_cie\\_lab](http://www.gusgsm.com/espacio_color_cie_lab). Consulta: julio 2017.

En 1976, para superar los problemas del modelo XYZ, la CIE desarrolló el modelo colorimétrico Lab (CIEL\*a\*b\*). El espacio CIEL\*a\*b\* permite especificar estímulos de color en un espacio tridimensional. Los ejes de coordenadas son  $a^*$  y  $b^*$ , son las coordenadas de cromaticidad:  $+a^*$  es la dirección hacia el rojo,  $-a^*$  hacia el verde,  $+b^*$  hacia el amarillo, y  $-b^*$  hacia el azul, respectivamente con valores que van del -120 al +120. Aquellos casos donde  $a=b=0$ , son acromáticos; por eso el eje  $L^*$  representa la escala acromática de grises que va de 0 (negro) a 100 (blanco), el cual indica claridad, ver figura 21.

Figura 21. **Espacio de color CIELAB**



Fuente: WESTLAND, S. *Diagramas de cromaticidad*.

[http://www.gusgsm.com/espacio\\_color\\_cie\\_lab](http://www.gusgsm.com/espacio_color_cie_lab). Consulta: julio 2017.

### 2.13.3.3. Diferencias de color CIELAB

El análisis de color no es más que una expresión numérica. Normalmente, es un análisis de la igualdad o diferencia de un color al compararlo con una norma establecida. CIEL\*a\*b\* se emplea para comparar los colores de dos objetos. Si los puntos en el espacio que representan estímulos visuales diferentes son coincidentes, entonces la diferencia cromática entre ambos estímulos es igual a cero.

Las expresiones de la diferencia de color entre estímulos son  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  y  $\Delta b^*$  respectivamente.

- $\Delta L^*$  es la diferencia en el valor de claridad/oscuridad. Los valores positivos indican mayor claridad y los valores negativos indican mayor oscuridad.
- $\Delta a^*$  es la diferencia en el eje rojo/verde. Los valores positivos indican más proporción de rojo y los negativos más proporción de verde.
- $\Delta b^*$  hace referencia al eje amarillo/azul, donde los valores positivos hablan de una mayor proporción de amarillo y los negativos de una mayor proporción de azul.

Dados  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  y  $\Delta b^*$  la diferencia total de color o distancia en el diagrama CIEL\*a\*b\* puede ser expresado como un valor único conocido como  $\Delta E^*$ . Según se incrementa la distancia entre esos dos puntos ( $L^*_t$ ,  $a^*_t$ ,  $b^*_t$  y  $L^*_0$ ,  $a^*_0$ ,  $b^*_0$ ), es razonable suponer que va aumentando la percepción de que existe una diferencia cromática entre los estímulos que ambos puntos representan.

Una forma de medir la diferencia cromática entre dos estímulos es, por tanto, medir la distancia euclidiana existente entre dos puntos en un espacio de tres dimensiones, designándola como  $\Delta E^*$ , esta distancia se puede calcular así:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \text{[Ecuación 3]}$$

$$\Delta L^* = L^*_t - L^*_0 \quad \text{[Ecuación 4]}$$

$$\Delta a^* = a^*_t - a^*_0 \quad \text{[Ecuación 5]}$$

$$\Delta b^* = b^*_t - b^*_0 \quad \text{[Ecuación 6]}$$

La expresión  $\Delta E^*$  se deriva de la palabra en alemán para sensación (*Empfindung*),  $\Delta E^*$  significa literalmente diferencia de sensación. El asterisco en la expresión  $\Delta E^*$  se suele usar para indicar que es una diferencia CIEL\*a\*b\*.

El valor límite para establecer diferencias de color aceptables e inaceptables depende de la ecuación usada, pero lo más importante es que también depende de la aplicación a la que se destina. El valor límite adecuado de aceptable/inaceptable solo lo puede determinar la experiencia práctica en cada caso. Así, el valor límite adecuado debería ser aquel que permitiera que cualquier par de tonos con un valor de diferencia por debajo de él fuera percibido como el mismo color. Los valores límite utilizados son análogos a los utilizados por Salmon y Cass en 1993.<sup>22</sup>

Tabla I. **Valores límite aplicados a la percepción humana de los cambios de color  $\Delta E^*$**

$\Delta E$	Efecto en el color
< 2	Colores resistentes. Diferencia de color inapreciable
2-8	Colores moderadamente reactivos. Diferencia de color gradualmente apreciable
> 8	Colores reactivos. Gran diferencia de color.

Fuente: SALMON, Lynn G.; CASS, Glen R. *The fading of artists' colorants by exposure to atmospheric nitric acid. Studies in Conservation.* p. 73-91.

#### 2.13.4. Espectrofotometría

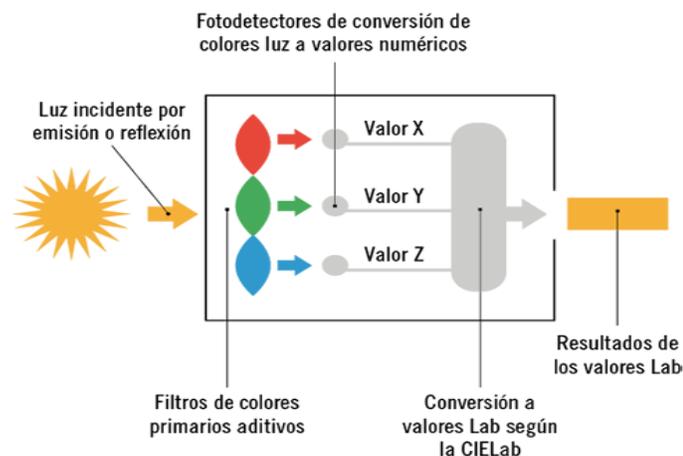
Hay dos tipos principales de instrumentos para medir el color de superficies opacas: espectrofotómetros de reflectancia y colorímetros. Los espectrofotómetros de reflectancia son, en la actualidad, los instrumentos más

<sup>22</sup> SALMON, Lynn G.; CASS, Glen R. *The fading of artists' colorants by exposure to atmospheric nitric acid. Studies in Conservation.* p. 73-91.

usados para medir el color. La tecnología espectral mide la luz reflejada o transmitida en muchos puntos del espectro visible, lo que da como resultado una curva, véase figura 23. Dado que la curva de cada muestra de color es única, es una excelente herramienta para identificar y comparar colores. La reflectancia de una muestra se expresa como una fracción entre 0 y 1 o como un porcentaje. Es fundamental tener en cuenta que los valores de reflectancia obtenidos son valores relativos, excepto para muestras fluorescentes, son independientes de la calidad y cantidad de la luz usada para iluminar la muestra.

Los colorímetros no son espectrofotómetros sino dispositivos que miden valores triestímulo usando filtros rojos, verdes y azules para emular la respuesta del ojo humano al color y la luz, ver figura 22. Los colorímetros usan un solo tipo de luz (incandescente o xenón pulsado) y no registran la reflectancia espectral, por lo que no pueden compensar el metamerismo. Los espectrofotómetros sí compensan este cambio, haciendo de ellos instrumentos más precisos para la medición del color, aunque los colorímetros son comparativamente más baratos de fabricar y fáciles de transportar.

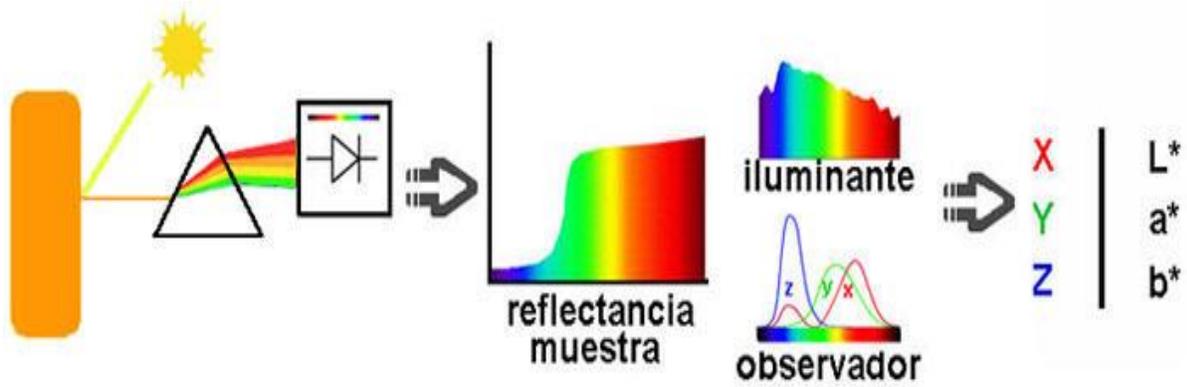
Figura 22. **Funcionamiento de un colorímetro**



Fuente: QUANTOTEC. *Color, luz y colorimetría*. <http://www.quantotec.com/sp/Colorimetria.htm>

Consulta: julio de 2017.

Figura 23. Funcionamiento de un espectrofotómetro



Fuente: QUANTOTEC. *Color, luz y colorimetría*. <http://www.quantotec.com/sp/Colorimetria.htm>  
Consulta: julio de 2017.

### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

Las variables involucradas en esta investigación se muestran en la siguiente tabla, según su intervención en el diseño metodológico.

Tabla II. Resumen de variables

Variable	Dimensional	Factor potencial de diseño	
		Constante	Variable
<b>Preparación de las muestras</b>			
Masa	g		X
Tiempo de sonicación	h	X	
Volumen	ml	X	
Humedad de curado	%	X	
Temperatura de curado	°C	X	
Proporción de las adiciones	%		X
Velocidad de agitación	rpm	X	
Tiempo de mezclado	s	X	
Potencia del mezclador	HP	X	
<b>Análisis de colorimetría</b>			
Concentración de Rodamina B	ppm	X	
Tiempo de exposición	h		X
Potencia de radiación	W/m <sup>2</sup>	X	
Temperatura	°C	X	
Humedad	%	X	
a*			X
b*			X
L*			X
<b>Análisis termogravimétrico</b>			
Temperatura de secado	°C	X	
Tiempo de secado	h	X	
Masa inicial de la muestra	mg	X	

Continuación tabla II.

<b>Análisis de hidrofobicidad</b>			
Permeabilidad	ml		X
Ángulo de contacto	°		X
Peso	g		X
Tiempo	h		X
<b>Análisis de difracción de rayos X</b>			
Longitud de radiación	$\lambda$	X	
Ángulo	°		X
Tamaño del cristal	nm		X

Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Delimitación del campo de estudio

El campo de estudio de esta investigación corresponde al área de la nanotecnología y ciencia de los materiales de construcción de la industria cementera. La caracterización, mezcla y evaluación de las muestras de mortero de recubrimiento se ejecutó en el Laboratorio del Centro de Investigación y Desarrollo CETEC de Cementos Progreso.

### 3.3. Recursos humanos disponibles

Investigadora: Br. Jennyfer Amalia Paiz Rosales

Asesorada por: PhD. Marlene Susana Arrechea Alvarado.

Gestiones de vinculación FIUSAC-CEMPRO: Ing. Rosa Amarilis Dubón

Profesionales de la empresa Cementos Progreso: Lic. Luis Velásquez

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

A continuación, se listan los materiales de apoyo utilizados durante la investigación.

#### **3.4.1. Reactivos**

- Nanopartículas de Dióxido de Titanio en fase anatasa y rutilo, grado reactivo marca Sigma-Aldrich
- Mortero de recubrimiento monocapa ultra liso marca Mixto Listo
- Agua desmineralizada marca Salvavidas
- Rodamina B grado analítico marca Merck
- Silicona hidrofóbica en polvo marca Dow Corning GP SHP 60+

#### **3.4.2. Instrumentos de medición**

- Analizador Termogravimétrico Mettler-Toledo TGA 1 Star System.
- Espectrofotómetro portátil Datacolor Check II.
- Difractómetro de rayos X PANalytical.
- Balanza analítica Explorer Pro. ® de Ohaus.
- Cronómetro Casio.
- Tubo de Karsten SaverSystem.
- Microscopio Opti-Tekscope.
- Termohigrómetro digital.

#### **3.4.3. Equipo auxiliar**

- Cámara oscura para fotocatalisis.
- Lámpara halógena UV.

- Amasadora mecánica.
- Sistema lavador ultrasónico 2014 Gilson Compay Inc.
- Espátula.
- Regla de acero.
- Apisonador.
- Vernier.
- Computador.

#### **3.4.4. Cristalería**

- Moldes metálicos.
- Pipetas.
- Vidrios de reloj.
- Probetas.
- Mortero y pistilo.
- Vasos de precipitados.

#### **3.4.5. Equipo de protección personal**

- Botas de laboratorio.
- Guantes de nitrilo.
- Mascarilla.
- Lentes.

#### **3.4.6. Software de medición y cálculos**

- Microsoft Excel versión 2016.
- ImageJ.
- Datacolor TOOLS.

### **3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa**

Las técnicas instrumentales utilizadas en esta investigación se clasifican en cuantitativas y cualitativas. Para la cuantificación de las variables, se utilizó el análisis de difracción de rayos X, análisis termogravimétrico, análisis de permeabilidad y análisis de absorción de agua por capilaridad. Asimismo, la técnica cualitativa que permitió la caracterización visual de la degradación de color de las muestras de esta investigación es el análisis colorimétrico y para el análisis de hidrofobicidad se utilizó el ángulo de contacto.

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

#### **3.6.1. Análisis de difracción de rayos X (XRD)**

Para obtener los espectros de difracción de rayos X, se utilizó un equipo de difracción de rayos con una longitud de onda de trabajo de 1,5406 Å, correspondiente a la radiación del cobre. Esta técnica fue empleada para verificar la cristalinidad de las nanopartículas de TiO<sub>2</sub>, determinando la proporción de cada fase. La preparación de la muestra se realizó colocando el polvo en un portamuestra de acero inoxidable.

#### **3.6.2. Preparación del colorante orgánico**

Se preparó una solución de 50 ppm de Rodamina B disolviendo 50 mg de colorante en 1000 ml de agua destilada. Para el descarte de la solución de rodamina B se procedió a verter los desechos en un recipiente debidamente identificados, para su posterior envío a incineración.

### **3.6.3. Dispersión de las nanopartículas deTiO<sub>2</sub>**

Se dispersaron las nanopartículas de TiO<sub>2</sub> en 25 ml agua desmineralizada mediante un tratamiento de sonicación por 30 minutos, en un lavador de ultrasonidos. La cantidad de nanopartículas de TiO<sub>2</sub> se calculó en una base de peso de mortero de 0.5%, 1.0% y 3.0%. El agua empleada se mezcló con la solución de rodamina B en una concentración de 50 ppm.

### **3.6.4. Preparación de muestras**

Se prepararon 8 tipos de las muestras:

- Muestra de referencia Y0 (mortero monocapa ultra liso).
- Muestra Y1 (mortero monocapa ultra liso/0,5%TiO<sub>2</sub>/0,5%Si).
- Muestra Y2 (mortero monocapa ultra liso/1,0%TiO<sub>2</sub>/0,5%Si).
- Muestra Y3 (mortero monocapa ultra liso/3,0%TiO<sub>2</sub>/0,5%Si).
- Muestra Y4 (mortero monocapa ultra liso/0,5%Si).
- Muestra Y5 (mortero monocapa ultra liso/0,5%TiO<sub>2</sub>).
- Muestra Y6 (mortero monocapa ultra liso/1,0%TiO<sub>2</sub>).
- Muestra Y7 (mortero monocapa ultra liso/3,0%TiO<sub>2</sub>).

La fase de amasado o mezclado mecánico de las muestras se basó en la norma UNE EN 196-1, Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas. El mortero se preparó en una mezcladora mecánica, como sigue: se colocó la paleta mezcladora y el recipiente de mezclado secos en su posición de trabajo en la mezcladora. Luego, se introdujeron los materiales para una amasada en el recipiente y se mezclaron en la siguiente forma:

- Se vertió toda el agua de mezclado que previamente fue adicionada con nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  y Rodamina B en el recipiente.
- Se agregó el mortero al agua y se mezcló durante 30 s a la velocidad lenta ( $140 \pm 5$  rpm).
- Se detuvo la mezcladora, se cambió a velocidad media ( $285 \pm 10$  rpm) y se mezcló durante 30 s.
- Se detuvo la mezcladora y se dejó reposar el mortero durante 90 s. Durante los primeros 15 s de este intervalo, se arrastró hacia el fondo con el raspador, el mortero adherido a la pared del recipiente. Durante el resto del intervalo, se tapó el recipiente.
- Se mezcló durante 60 s a velocidad media ( $285 \pm 10$  rpm).

Al terminar el mezclado, la paleta de mezclado fue sacudida para volcar el exceso de mortero al tazón de mezclado. Con la mezcla hecha, se elaboraron de las probetas; se limpiaron, engrasaron y armaron los moldes, utilizando moldes cúbicos de 2 pulgadas. Se colocó una capa de mortero de aproximadamente la mitad de la profundidad del molde en todos los compartimientos del cubo. Se apisonó el mortero en cada compartimiento cúbico 32 veces en aproximadamente 10 s en 4 rondas, cada ronda en ángulos rectos respecto a las otras caras y se dieron 8 pequeños golpes sobre la superficie del espécimen. Cuando el apisonado de la primera capa en todos los compartimientos cúbicos fue completado, se llenaron los compartimientos con el mortero restante. Luego, se apisonaron como se especificó para la primera capa. Durante el apisonado de la segunda capa, se introdujo al molde, el mortero forzado hacia fuera sobre la parte superior de los moldes después de cada ronda de apisonado. Al completar el apisonado, la parte superior de todos los cubos se extendió levemente por encima de las partes superiores de los moldes y suavizando los cubos pasando el lado plano de la llana (con el borde levemente levantado) a través de la parte superior de cada cubo en ángulos rectos a la longitud del molde. Se cortó el

mortero a una superficie plana a nivel con la parte superior del molde, pasando el canto recto de la espátula con un movimiento de aserrado sobre la longitud del molde. Las muestras se colocaron en una habitación de curado a temperatura ( $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ) y una humedad relativa de no menos de 90%. Las muestras se retiraron de los moldes y, después de 48 h, se almacenaron en un ambiente de curado hasta el momento de ensayarlas.

### **3.6.5. Análisis colorimétrico**

El análisis colorimétrico se basa en la norma italiana UNI 11259-2016, para la determinación de la actividad fotocatalítica en morteros hidráulicos por el método de la Rodamina. Se introdujeron las probetas en una cámara oscura que mantiene la humedad y temperatura constante en unas condiciones de  $20^{\circ}\text{C}$  y 70% de humedad relativa durante 24 horas, posteriormente se las irradió con luz ultravioleta. Se les midió el color mediante un colorímetro de superficies a los 0 minutos, 4 horas, 24 horas, 48 horas, 3 días, 7 días, 14 días y 28 días. Se tomaron 10 valores de color de las variables  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , descartando el valor que más se desvió de la media, para observar la degradación del mismo.

### **3.6.6. Análisis de Termogravimetría (TGA)**

La finalidad del ensayo termogravimétrico es conocer la composición del mortero de recubrimiento y el comportamiento de sus componentes y la adición de compuestos con el incremento de calor. Las muestras ensayadas fueron pequeños fragmentos de otras probetas, obtenidas de muestras utilizadas. Las composiciones ensayadas para este ensayo fueron de mortero sin  $\text{TiO}_2/\text{Si}$  en diferentes proporciones y con este compuesto. Para realizar los ensayos de TGA, se molió una de las muestras de cada dosificación, primero, mediante un procedimiento manual. Luego, se utilizó un mortero de ágata, hasta obtener un

polvo fino. La masa pulverizada se mezcló en una bolsa hermética de plástico para homogeneizarla teniendo la precaución de no dejar aire en las mismas que pudiera carbonatar las muestras. El ensayo se realizó con un analizador térmico simultáneo en el que se empleó una muestra de 31,50 mg, una rampa de calentamiento dinámico que varía entre 25°C y 1000°C, y una velocidad de calentamiento de 10°C/min. Se utilizaron crisoles de alúmina y una atmósfera de ensayo de nitrógeno (N<sub>2</sub>).

### **3.6.7. Análisis de permeabilidad**

Se fijó la base circular del tubo de Karsten a la superficie de la muestra por evaluar por medio de una masilla plástica o silicona. Una vez instalado, se vertió agua destilada en él, hasta la altura dentro del tubo de 5 ml. Se ejerció presión sobre la superficie de la muestra. Se consideró que 1 cm de altura de columna de agua corresponde a una presión de 0.098 kN/m.<sup>26</sup>

La cantidad de agua absorbida por unidad de tiempo por parte de la muestra se midió directamente. Se efectuó la lectura en la escala que posee el tubo de Karsten en ml. Se realizaron ensayos sobre muestras de referencia solamente de mortero monocapa ultra liso y con muestras de mortero monocapa ultra liso adicionados con TiO<sub>2</sub>-Si.

### **3.6.8. Análisis de ángulo de contacto**

Se utilizó el método de la gota sésil. Se alineó el centro del escenario con el centro de la cámara del microscopio. Se colocó la muestra en el bloque moviendo hacia el foco y deslizando hacia la cámara. Se aumentó la altura del escenario hasta que la parte superior de la muestra estuviera centrada y nivelada en la cámara. Se colocó la fuente de luz detrás de la muestra iluminando la etapa uniformemente. Se colocó una pequeña gota (0,5-3,0 µL) de agua sobre de la

muestra usando una micropipeta y se colocó la gota en el borde de la muestra más cercano a la cámara. Se midió el ángulo de contacto de la gota en la imagen, utilizando el software ImageJ con un complemento para mediciones de ángulos de contacto.

### 3.6.9. Análisis de absorción de agua por capilaridad

Este ensayo se realizó siguiendo la norma UNE 83982:2008. De cada probeta previamente elaborada y curada durante 28 días, se tomó una muestra por adición. Posteriormente, las muestras secas se colocaron dentro de un recipiente con la superficie en estudio justo en contacto con agua (no más de 5 mm de altura). Los recipientes fueron tapados, para lograr que la humedad relativa en su interior sea superior al 95 %. A distintos intervalos (½, 1, 2, 3, 24, 48, 72, 96 horas) las muestras se retiraron de los recipientes, se secaron con un paño y se pesaron con una balanza electrónica de 0,01 g de precisión.

Para cada muestra (i) en el instante de lectura (t) se determina el incremento de masa por unidad de área ( $C_{it}$ ), mediante la ecuación siguiente:

$$C_{it} = \frac{M_{hit} - M_{si}}{A_i} \quad \text{[Ecuación 7]}$$

La capacidad de succión capilar de cada probeta ( $C_{it}$ ), en gramos por metro cuadrado, es el valor del incremento de masa por unidad de área de la sección transversal de la probeta (i), en el instante de lectura (t), ( $C_{it}$ ), que corresponde al tiempo (t) cuando la variación de masa es menor que 0.1% entre dos determinaciones sucesivas de la masa húmeda ( $M_{hi}$ ).

### 3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Tabla III. Codificación de las muestras

<b>Código</b>	<b>Nombre de la muestra</b>
Y01	Mortero ultra liso con agua
Y02	
Y03	
Y11	Mortero ultra liso con agua de Rodamina B, 0,0% de TiO <sub>2</sub> y 0,0% de Si
Y12	
Y13	
Y21	Mortero ultra liso con agua de Rodamina B, 0,5% de TiO <sub>2</sub> y 0,5% de Si
Y22	
Y23	
Y31	Mortero ultra liso con agua de Rodamina B, 1,0% de TiO <sub>2</sub> y 0,5% de Si
Y32	
Y33	
Y41	Mortero ultra liso con agua de Rodamina B, 3,0% de TiO <sub>2</sub> y 0,5% de Si
Y42	
Y43	
Y51	Mortero ultra liso con agua de Rodamina B, 0,5% de TiO <sub>2</sub>
Y52	
Y53	
Y61	Mortero ultra liso con agua de Rodamina B, 1,0% de TiO <sub>2</sub>
Y62	
Y63	
Y71	Mortero ultra liso con agua de Rodamina B, 3,0% de TiO <sub>2</sub>
Y72	
Y73	
Y81	Mortero ultra liso con agua, 0,5% de Si
Y82	
Y83	

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Proporciones de mezcla del mortero de recubrimiento**

<b>Mezcla</b>	<b>Relación TiO<sub>2</sub>/Si (%)</b>	<b>Nano- partículas TiO<sub>2</sub> (g)</b>	<b>Silicona Si (g)</b>	<b>Mortero Pre- mezclado (g)</b>	<b>Agua (ml)</b>	<b>Relación agua / mortero</b>
Y0	0/0	0,00	0,00	300,00	150,00	0,50
Y1	0/0	0,00	0,00	300,00	150,00	0,50
Y2	0,5/0,5	1,50	1,50	297,00	148,50	0,50
Y3	1,0/0,5	3,00	1,50	295,50	147,75	0,50
Y4	3,0/0,5	9,00	1,50	289,50	144,75	0,50
Y5	0,5/0,0	1,50	0,00	298,50	149,25	0,50
Y6	1,0/0,0	3,00	0,00	297,00	148,50	0,50
Y7	3,0/0,0	9,00	0,00	291,00	145,50	0,50
Y8	0,0/0,5	0,00	1,50	298,50	149,25	0,50

Fuente: elaboración propia.

### 3.8. Análisis estadístico

Se realizó con medidas de tendencia central y análisis de varianza. Las muestras fueron evaluadas para la actividad fotocatalítica heterogénea en nueve tiempos diferentes, 0h, 4 h, 24 h, 48 h, 72 h, 168 h, 336 h, 504 h, 672 h, en triplicado cada muestra.

#### 3.8.1. Medidas de tendencia central

##### 3.8.1.1. Media aritmética

Es un cálculo del promedio para obtener datos más exactos, se determina por la suma de los datos obtenidos, dividido el número de datos.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

[Ecuación 8]

#### 3.8.2. Medidas de dispersión

##### 3.8.2.1. Varianza

A partir de la media aritmética se conoce la dispersión entre valores para una misma medición respecto del promedio.

$$S^2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}}$$

[Ecuación 9]

### **3.8.3. Análisis de varianza (ANOVA)**

#### **3.8.3.1. Análisis de varianza de un solo factor**

El análisis de la varianza ANOVA permite evaluar la existencia de diferencias significativas entre grupos de muestras evaluados en función de los distintos niveles que se puedan presentar para uno o más factores. El análisis univariado o de un solo factor significa que se realiza el análisis de una variable a la vez. Se utilizó una hipótesis (hipótesis nula) para verificar que las diferencias significativas entre los grupos de muestras no se presentan únicamente por cuestión de azar.

Mediante el análisis de la varianza de un factor se estudiaron las posibles diferencias significativas entre las variables  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  para las muestras de mortero. El análisis de varianza indica los parámetros influyentes en el tratamiento fotocatalítico, con un nivel de confianza del 95%, es decir, un error máximo permisible del 5%. Se aplicó un análisis estadístico, empleando el software Microsoft Excel 2016.

El análisis de varianza que se realizó permite verificar si se aprueba la hipótesis nula. No existe diferencia significativa entre los valores de  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  para las muestras de mortero de recubrimiento adicionados con nanopartículas de dióxido de titanio  $TiO_2$  y las muestras de mortero de recubrimiento adicionados con  $TiO_2/Si$ . Según el teorema de identidad de la suma de cuadrados, se obtienen tres medidas importantes de variabilidad, véase tabla V y VI.

Tabla V. **Medidas de variabilidad**

$$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n y_{ij} - y_{..}^2 = \text{suma total de cuadrados}$$

$$SSA = n \sum_{i=1}^k y_i - y_{..}^2 = \text{suma de los cuadrados del tratamiento}$$

$$SSE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n y_{ij} - y_i^2 = \text{suma de los cuadrados de los errores}$$

Fuente: WALPOLE, Ronald. *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. p. 515.

Tabla VI. **Análisis de varianza de un solo factor**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	f calculada
Parámetro	SSA	k-1	$s_1^2 = \frac{SSA}{k-1}$	$\frac{s_1^2}{s_2^2}$
Error	SSE	k n-1	$s^2 = \frac{SSE}{k n-1}$	
Total	SST	kn-1		

Fuente: WALPOLE, Ronald. *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. p. 515.

Para decidir sobre la aceptación de la hipótesis nula se realiza una prueba de Fisher. El factor de Fisher teórico se obtendrá de la tabla de Fisher con nivel de significancia de 0,05.

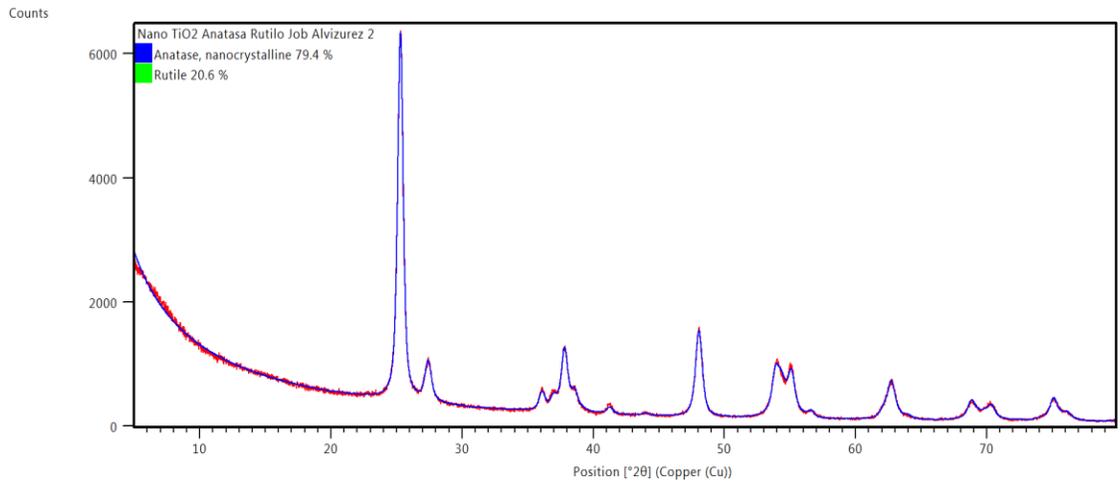
### Regla de decisión

- Si  $F_c \geq F_t$ : Se rechaza la hipótesis nula (es decir, sí existen diferencias significativas)
- Si  $F_c < F_t$ : No se rechaza la hipótesis nula.



## 4. RESULTADOS

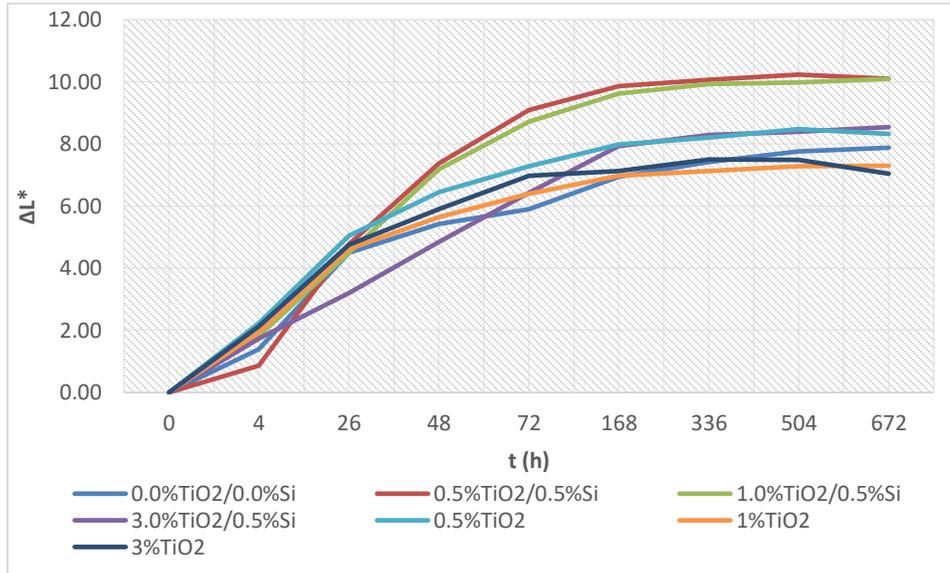
Figura 24. Diagrama de difracción de rayos X obtenido con nanopartículas de TiO<sub>2</sub> en fase anatasa y rutilo



Fase Mineral	Fórmula química	Concentración en % p/p	Parámetros cristalográficos		
			Sistema Cristalino	Parámetros de red	
Anatasa	TiO <sub>2</sub>	79.40	Tetragonal	a=3,7860 Å b=3,7860 Å c=9,4950 Å	α = 90° β = 90° γ = 90°
Rutilo	TiO <sub>2</sub>	20.60	Tetragonal	a=4,5940 Å b=4,5940 Å c=2,9610 Å	α = 90° β = 90° γ = 90°

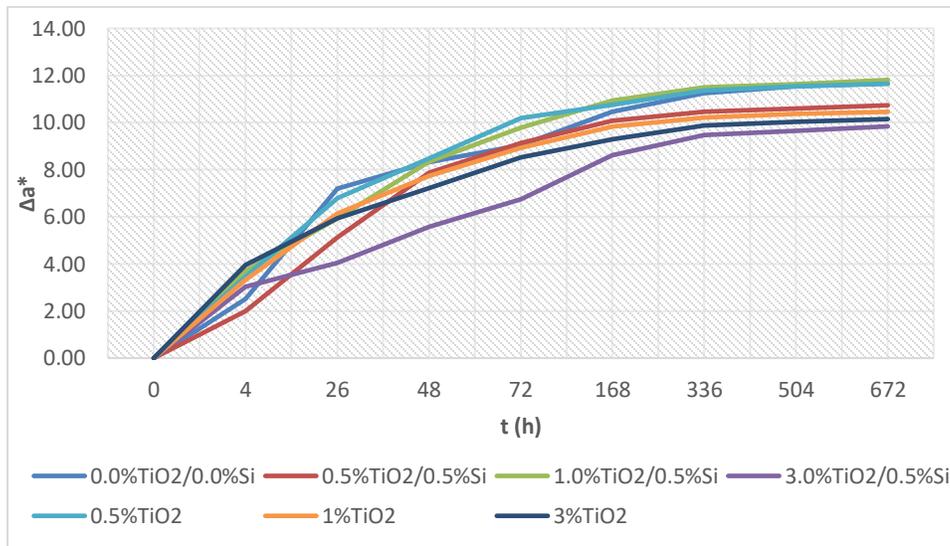
Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Diferencia de L\* en función del tiempo para diferentes adiciones de TiO<sub>2</sub>/Si**



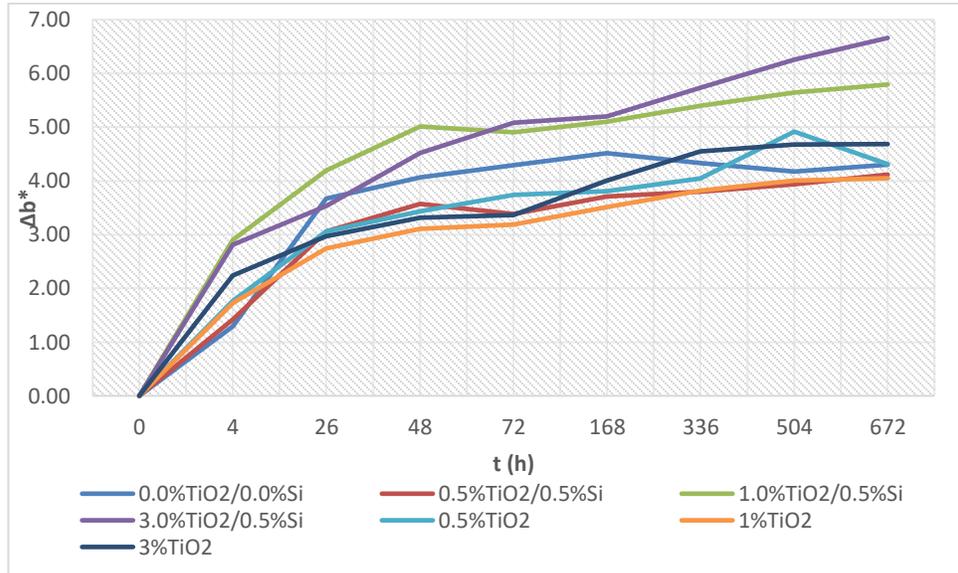
Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Diferencia de a\* en función del tiempo para diferentes adiciones de TiO<sub>2</sub>/Si**



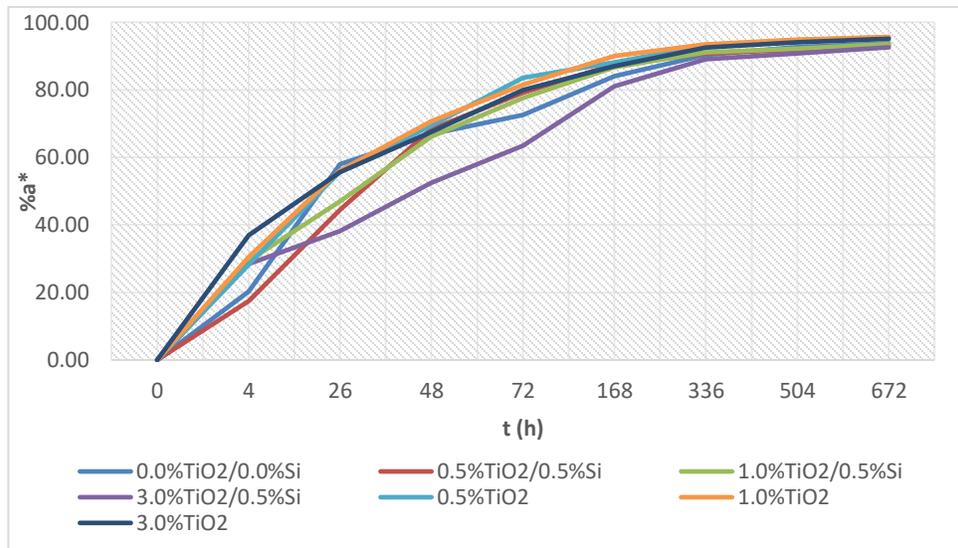
Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Diferencia de b\* en función del tiempo para diferentes adiciones de TiO<sub>2</sub>/Si**



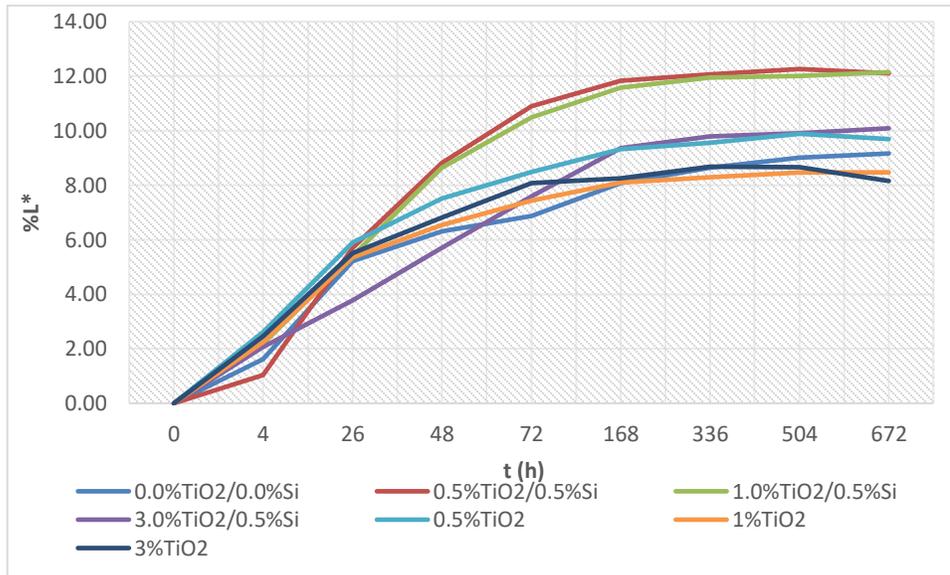
Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Degradación de a\* en función del tiempo para diferentes adiciones de TiO<sub>2</sub>/Si**



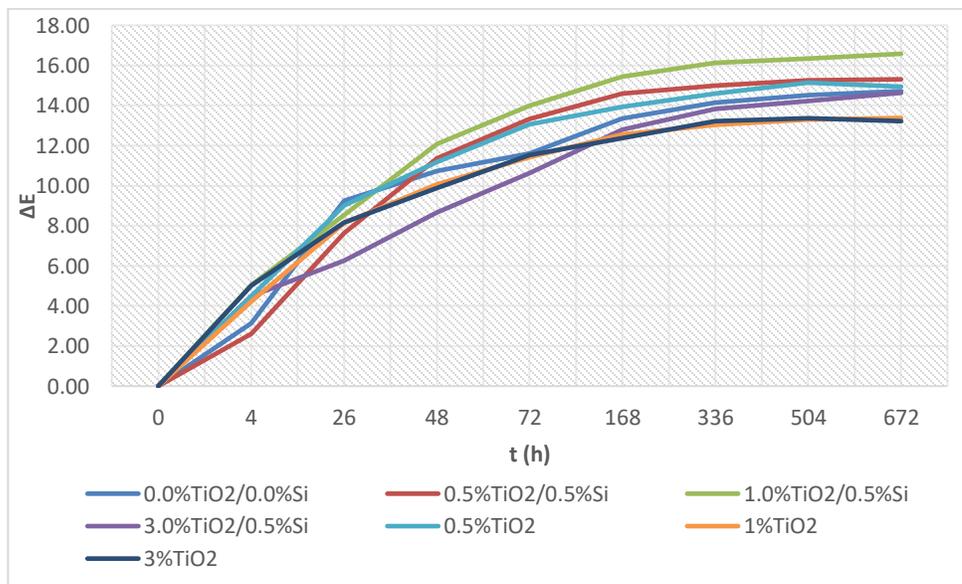
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. Degradación de L\* en función del tiempo para diferentes adiciones de TiO<sub>2</sub>/Si



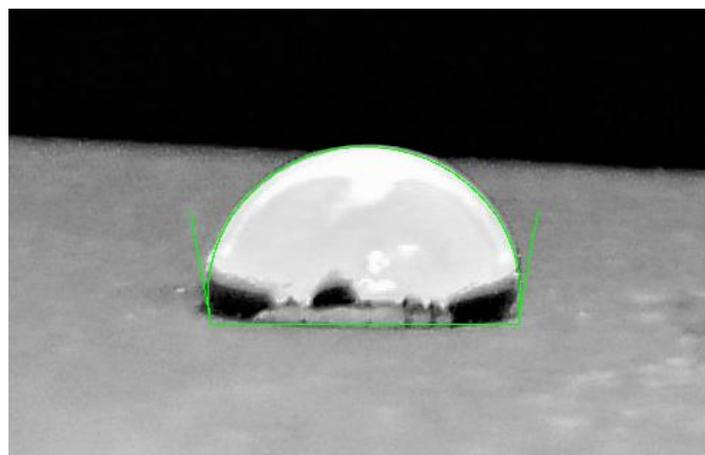
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Diferencia de E\* en función del tiempo para diferentes adiciones de TiO<sub>2</sub>/Si



Fuente: elaboración propia.

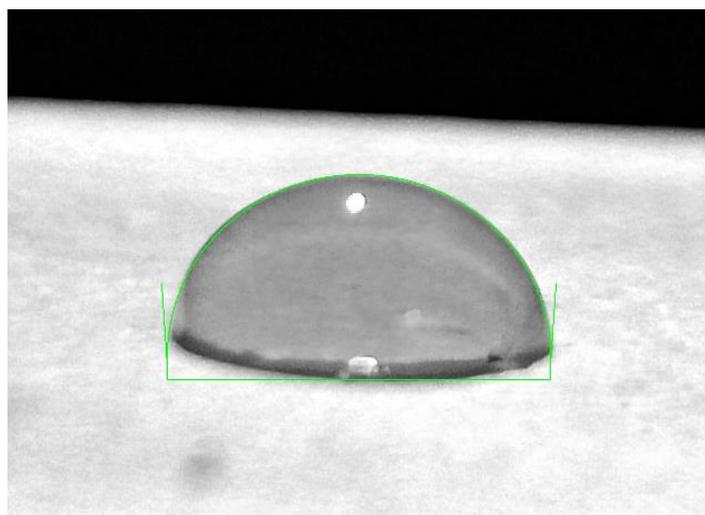
Figura 31. **Ángulo de contacto para la muestra Y1 antes de irradiación UV**



<b>Ángulo de contacto (°)</b>	71,228
-------------------------------	--------

Fuente: elaboración propia.

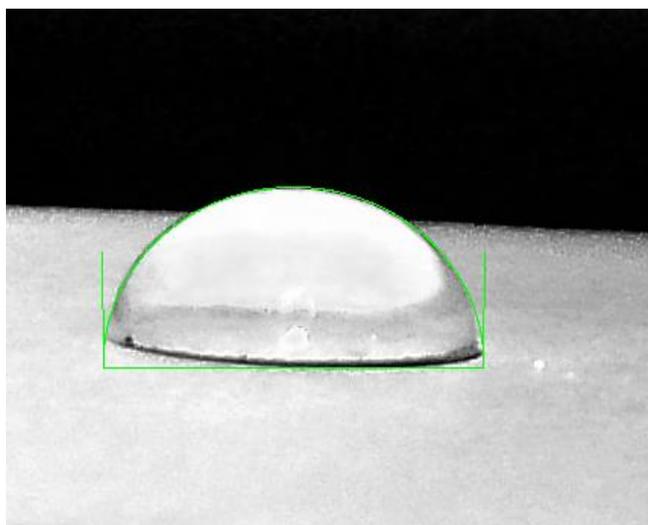
Figura 32. **Ángulo de contacto para la muestra Y2 antes de irradiación UV**



<b>Ángulo de contacto (°)</b>	94,078
-------------------------------	--------

Fuente: elaboración propia.

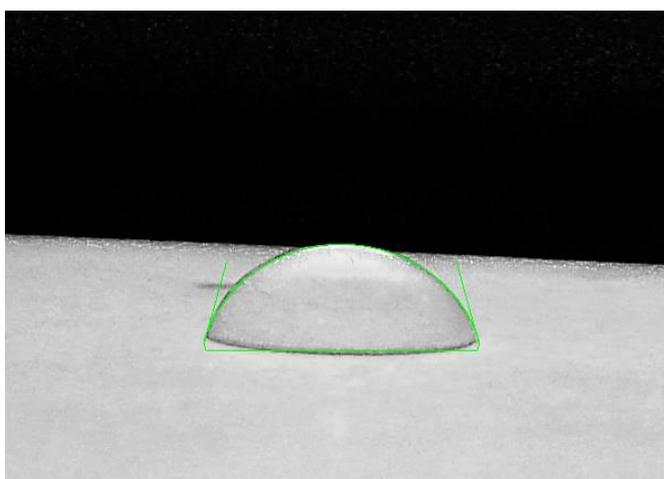
Figura 33. **Ángulo de contacto para la muestra Y3 antes de irradiación UV**



<b>Ángulo de contacto (°)</b>	89,494
-------------------------------	--------

Fuente: elaboración propia.

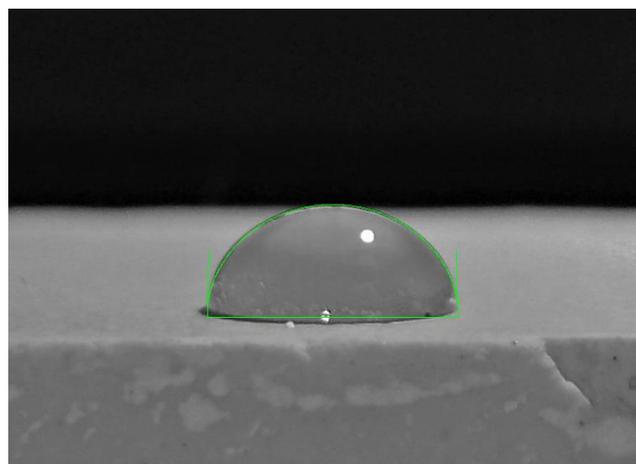
Figura 34. **Ángulo de contacto para la muestra Y4 antes de irradiación UV**



<b>Ángulo de contacto (°)</b>	75,728
-------------------------------	--------

Fuente: elaboración propia.

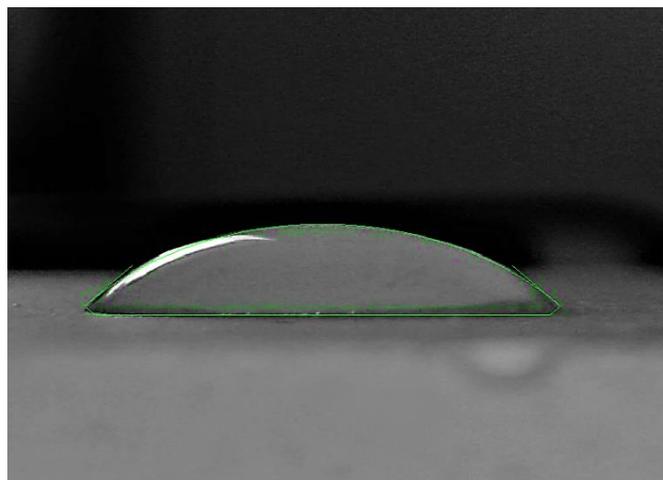
Figura 35. **Ángulo de contacto para la muestra Y8 antes de irradiación UV**



<b>Ángulo de contacto (°)</b>	87,727
-------------------------------	--------

Fuente: elaboración propia.

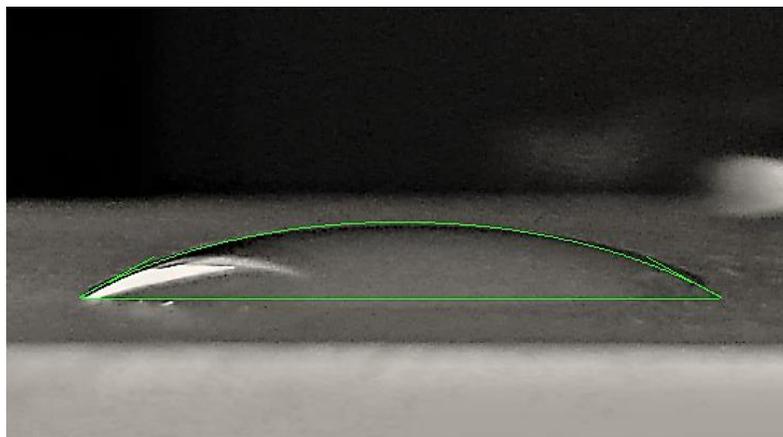
Figura 36. **Ángulo de contacto para la muestra Y1 después de irradiación UV**



<b>Ángulo de contacto (°)</b>	38,876
-------------------------------	--------

Fuente: elaboración propia.

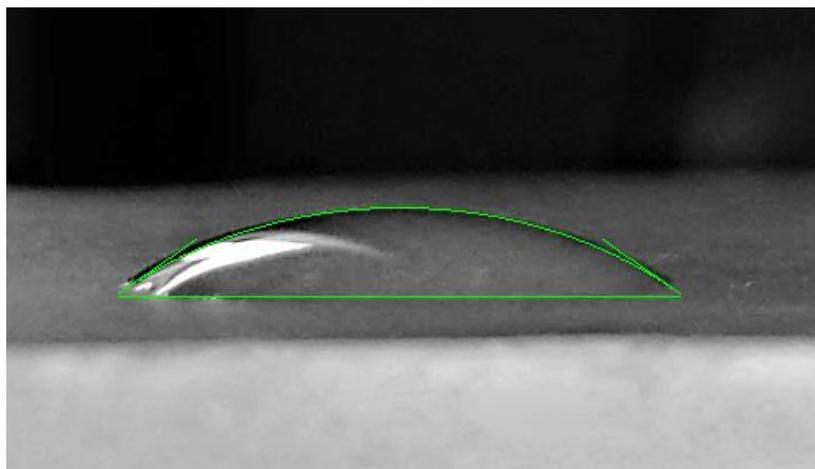
Figura 37. **Ángulo de contacto para la muestra Y2 después de irradiación UV**



Ángulo de contacto (°)	22,934
------------------------	--------

Fuente: elaboración propia.

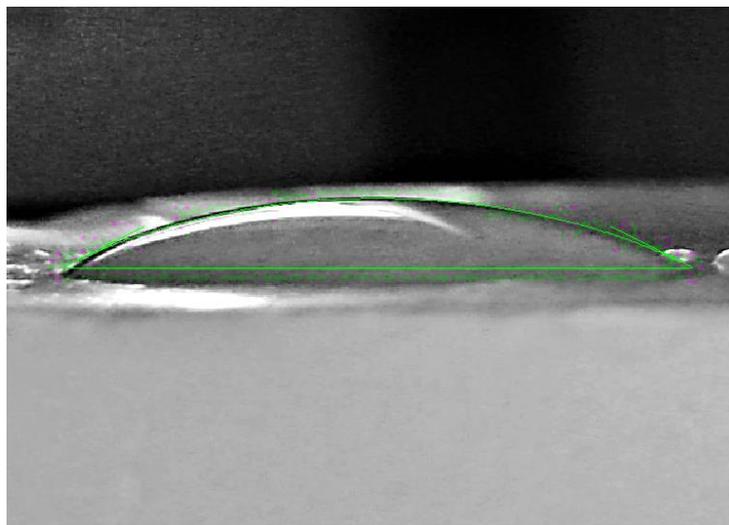
Figura 38. **Ángulo de contacto para la muestra Y3 después de irradiación UV**



Ángulo de contacto (°)	26,009
------------------------	--------

Fuente: elaboración propia.

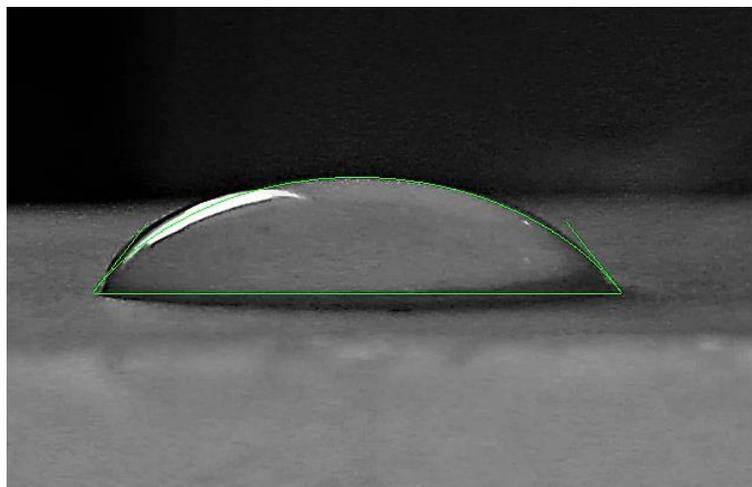
Figura 39. **Ángulo de contacto para la muestra Y4 después de irradiación UV**



<b>Ángulo de contacto (°)</b>	27,074
-------------------------------	--------

Fuente: elaboración propia.

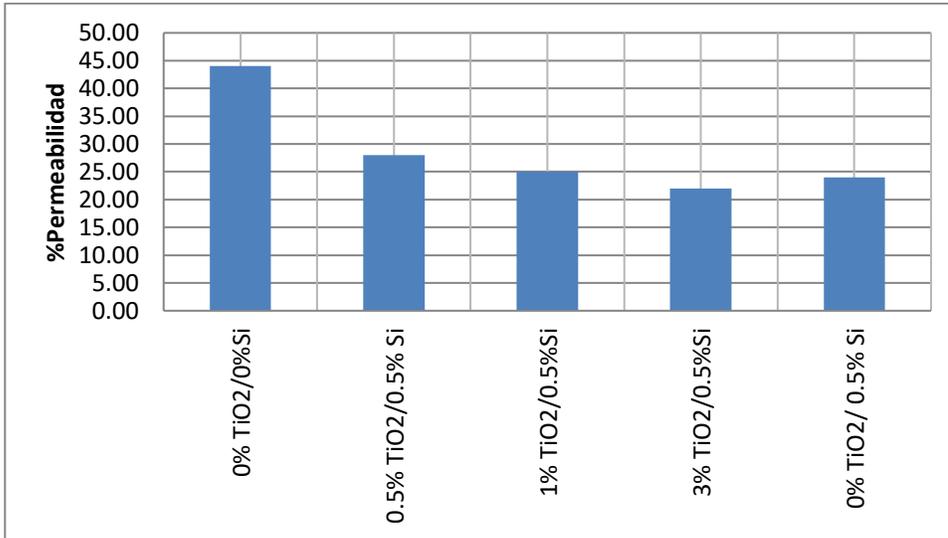
Figura 40. **Ángulo de contacto para la muestra Y8 después de irradiación UV**



<b>Ángulo de contacto (°)</b>	51,875
-------------------------------	--------

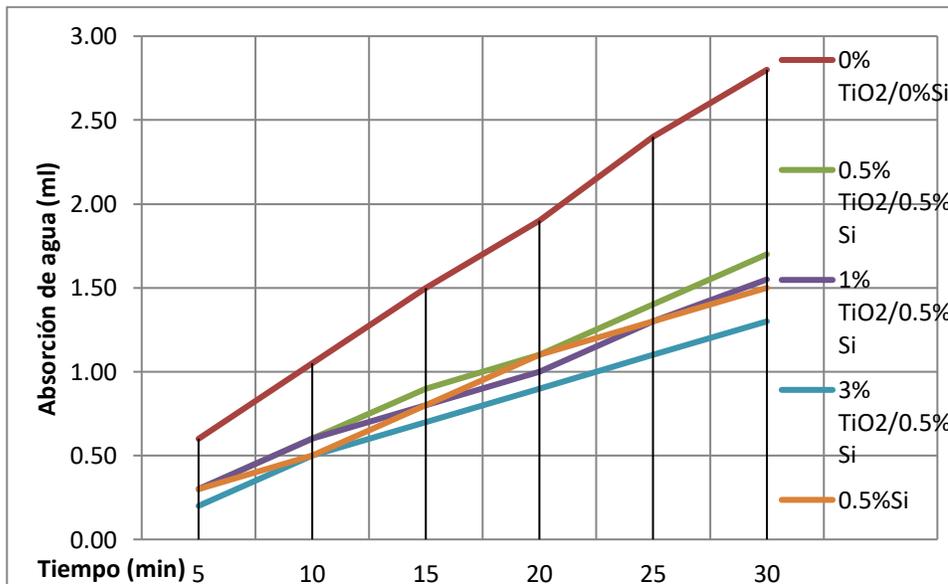
Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Porcentaje de permeabilidad**



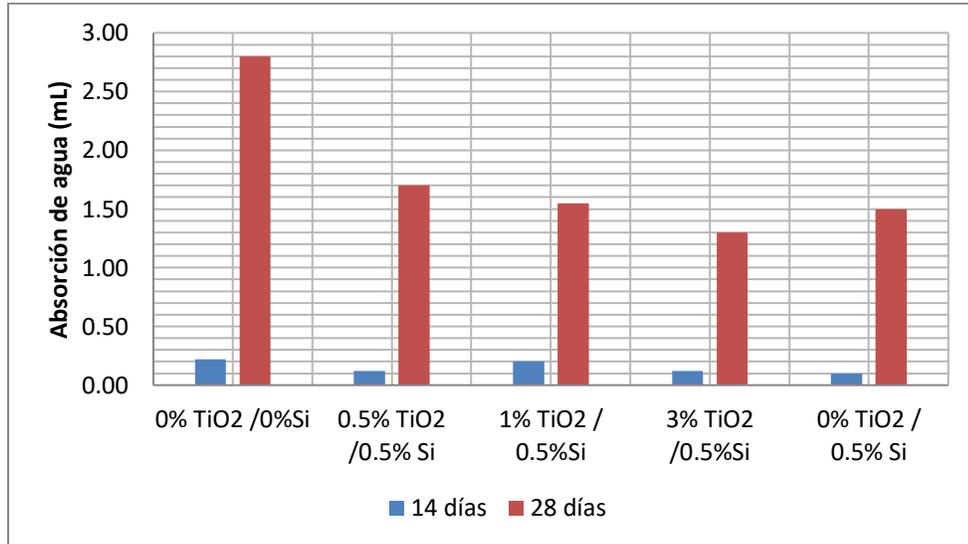
Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Tasa de absorción de agua por permeabilidad en función del tiempo**



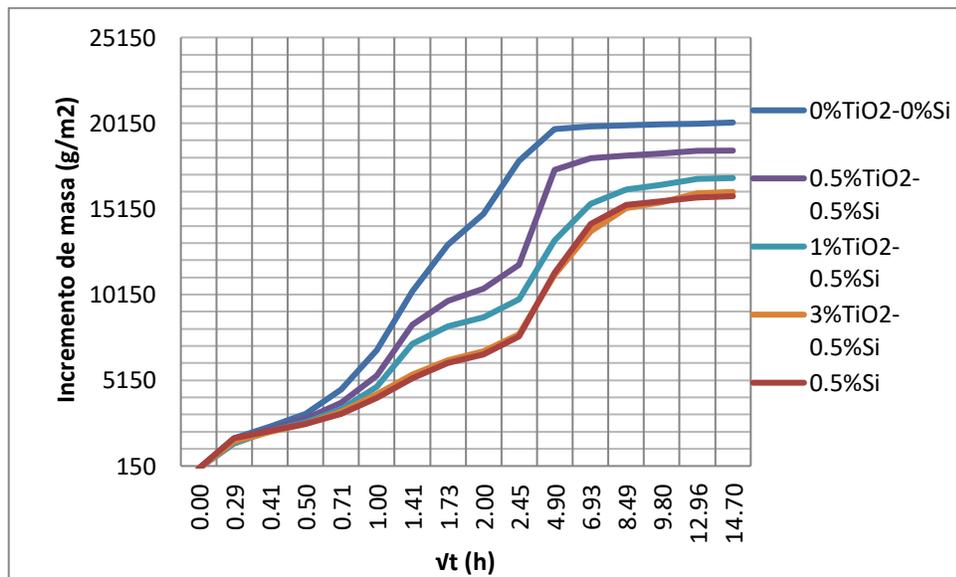
Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Absorción de agua por permeabilidad a 14 días y 28 días**



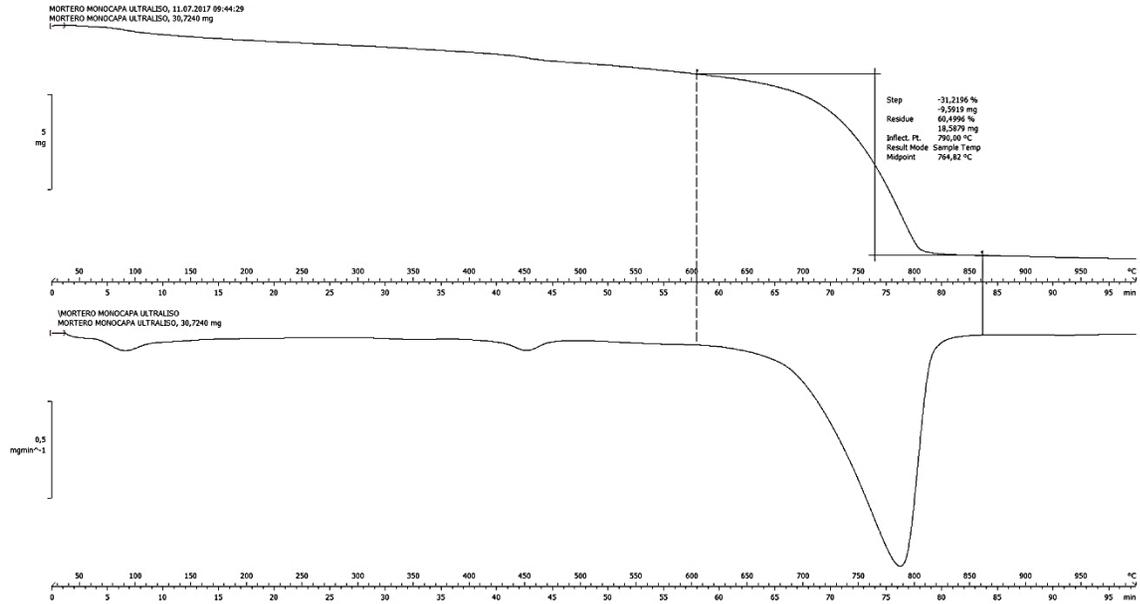
Fuente: elaboración propia.

Figura 44. **Capacidad de succión capilar en función del tiempo**



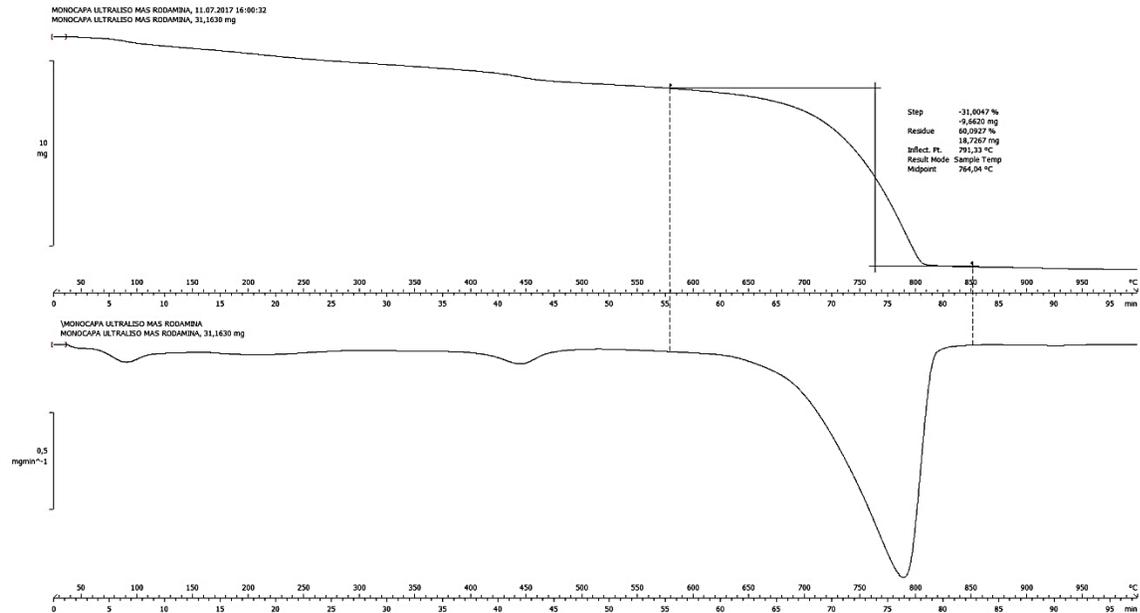
Fuente: elaboración propia.

Figura 45. Termograma de muestra Y0



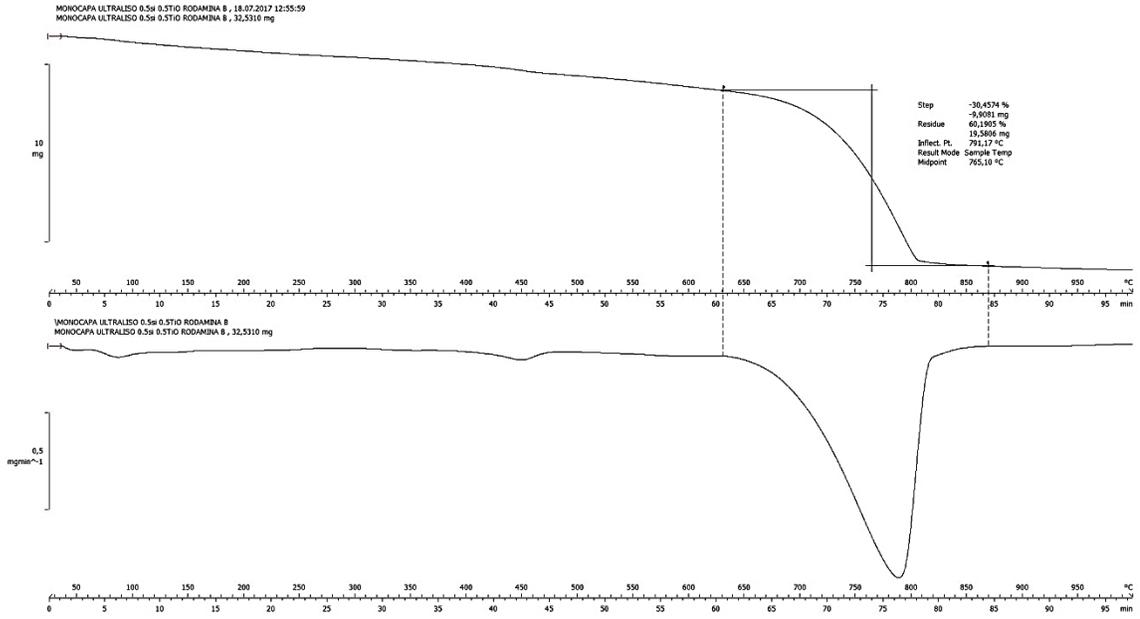
Fuente: elaboración propia.

Figura 46. Termograma de muestra Y1



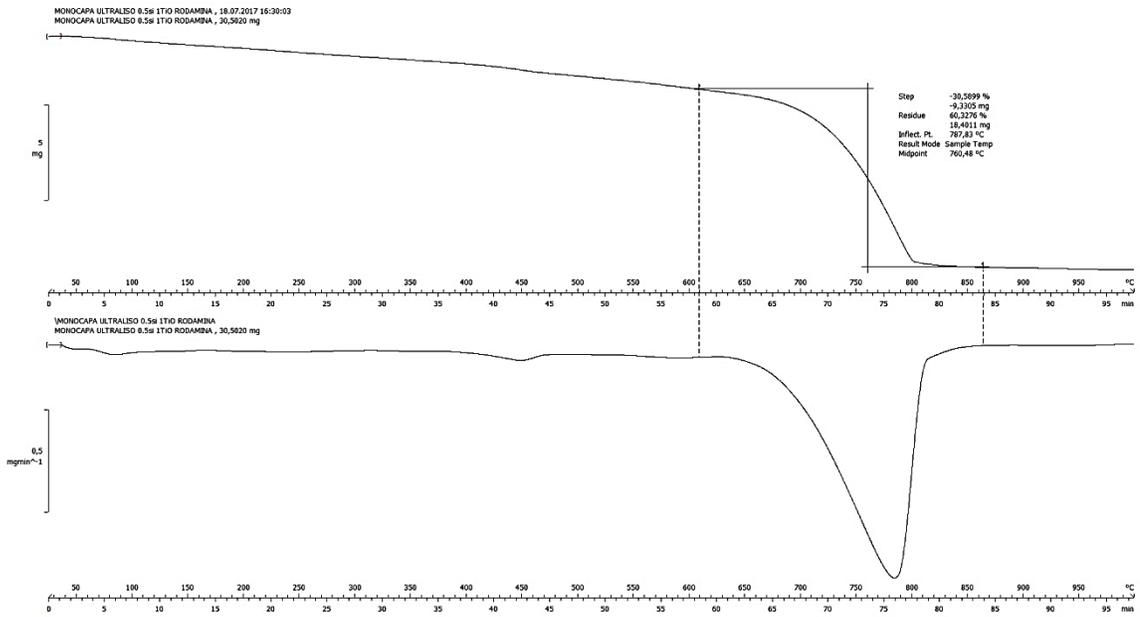
Fuente: elaboración propia.

Figura 47. Termograma de muestra Y2



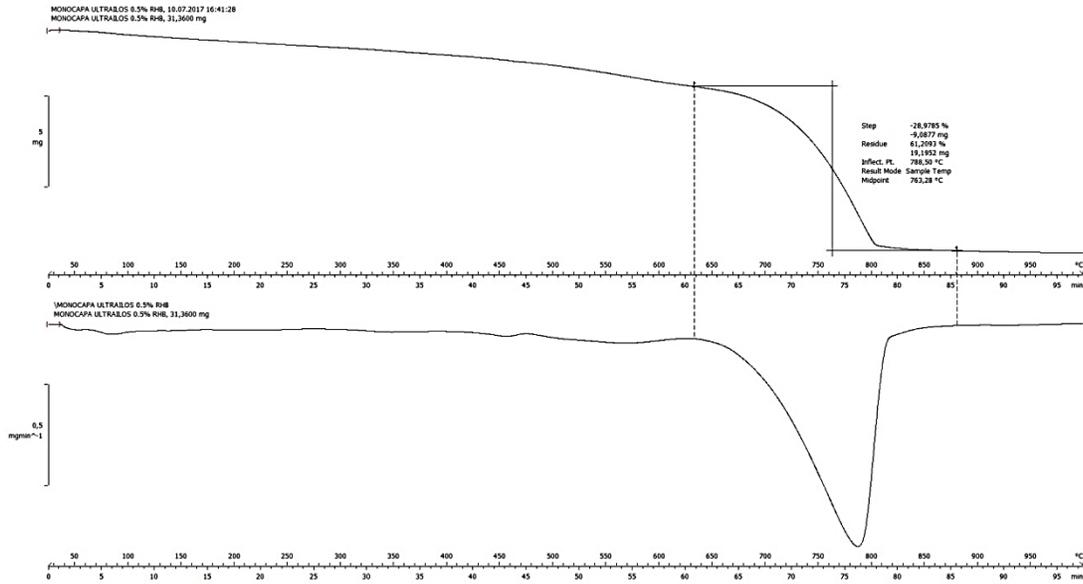
Fuente: elaboración propia.

Figura 48. Termograma de muestra Y3



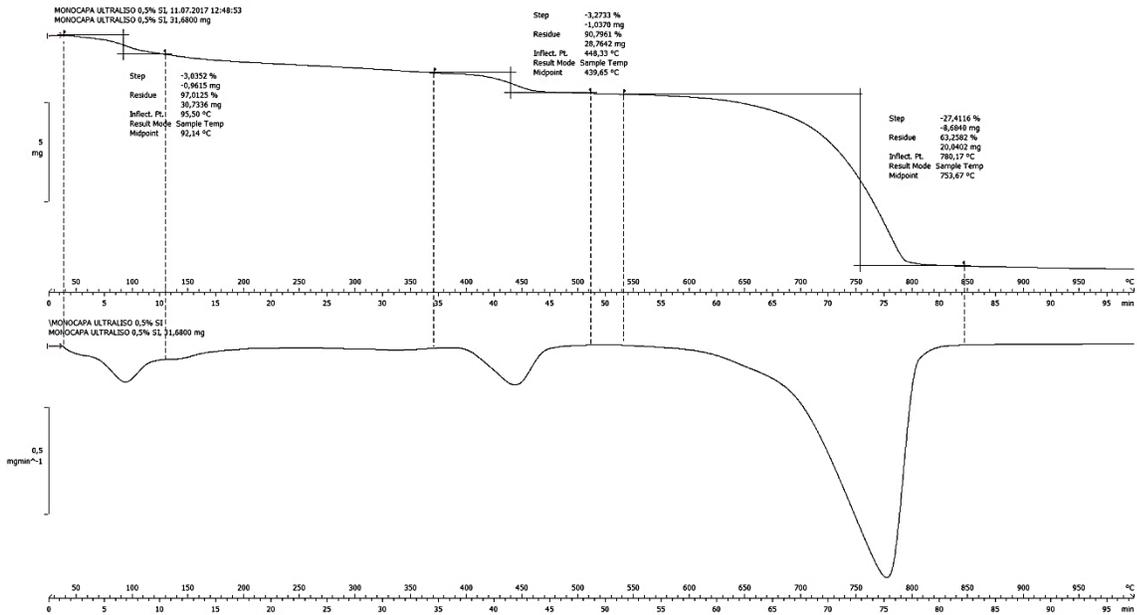
Fuente: elaboración propia.

Figura 49. Termograma de muestra Y4



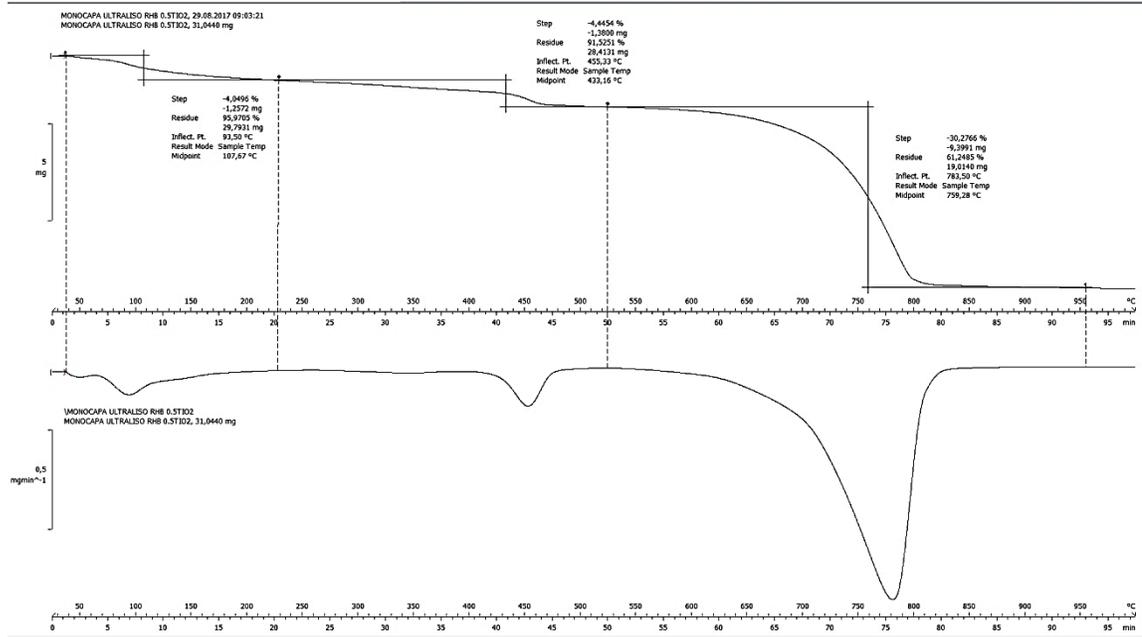
Fuente: elaboración propia.

Figura 50. Termograma de muestra Y8



Fuente: elaboración propia.

Figura 51. Termograma de muestra Y5



Fuente: elaboración propia.



## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### 5.1. Respecto a la caracterización por difracción de rayos X en las nanopartículas de TiO<sub>2</sub>.

Se ha cuantificado la proporción de las dos fases cristalinas, anatasa y rutilo, presentes en las nanopartículas de dióxido de titanio, mediante la relación de los picos característicos en el difractograma de rayos X (figura 24), considerando los planos cristalográficos (101) y (110) para la anatasa y el rutilo, respectivamente. Las nanopartículas exhibieron líneas de difracción en  $2\theta$ : 25°, 38°, 48°, 54°, 55°, 63°, 71° y 75°, que corresponden a los planos cristalográficos (101), (004), (200), (105), (211), (204), (116) y (311), que caracterizan la fase anatasa (tetragonal) del óxido de titanio.<sup>23</sup> Los tamaños de cristal obtenidos para las partículas de dióxido de titanio fueron obtenidos a partir del difractograma de rayos X aplicando la ecuación de Debye-Scherrer, sustituyendo los valores para  $k=0,94$ ,  $\lambda =1,5406 \text{ \AA}$ ,  $\theta_{\text{máx}}=25,2963^\circ$  y  $\beta=0,4913$ , obteniendo un valor para el tamaño de cristal correspondiente a 3,26 nm, clasificándose como un sólido nanocristalino. El dióxido de titanio presenta una mezcla de fases cristalinas, una minoría pertenece a la fase rutilo ( $2\theta$ : 27°, 36°, 41°, 44° y 57°) y la otra mayoría pertenece a la fase anatasa (tetragonal), observando un tamaño de cristal entre 1-150 nm.

El tamaño de cristal y la dispersión homogénea de TiO<sub>2</sub> son dos factores importantes para la degradación fotocatalítica efectiva. Por lo que el grado de

---

<sup>23</sup> ISMAIL, A.A., Hakki, A. and Bahnemann, D.W. *Mesostructure Au/TiO<sub>2</sub> Nanocomposites for Highly Efficient Catalytic Reduction of p-Nitrophenol*. p.145-151.

cristalinidad del dióxido de titanio y la composición de las fases cristalinas influyen en la actividad fotocatalítica. En este sentido, el tamaño medio de cristal es un parámetro crítico que influye determinantemente en la actividad fotocatalítica de forma que, un aumento del tamaño de cristal, conlleva un mayor grado de cristalinidad y, por tanto, un aumento del número de centros de recombinación del par e-/h+, mejorando la eficiencia del proceso fotocatalítico.

## **5.2. Respecto a la determinación de la actividad fotocatalítica**

La degradación de los colorantes orgánicos que pueden extenderse uniformemente sobre una superficie dada se consideran contaminantes líquidos. Su adición en la matriz del mortero es equivalente a manchar la propia superficie. La rodamina B fue preparada en solución con agua desmineralizada a una concentración de 0,05 g/L. No se utilizó una mayor concentración dado que la rodamina B es considerada reactivo cancerígeno, según la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.<sup>24</sup> Por lo tanto, se realizó la prueba basada en la degradación de la rodamina B, que establece la norma UNI 11259:2016, ya que es una metodología rápida de probar la actividad fotocatalítica. Se hizo una medición semicuantitativa de su degradación, midiendo la pérdida de intensidad de color por absorción de luz en función del tiempo. La actividad fotocatalítica del TiO<sub>2</sub> determinada demostró que la presencia del catalizador redujo la coloración de rodamina B.

Se escogió el cambio en la coordenada  $\Delta a^*$  como una variable respuesta de interés puesto que la rodamina B es un pigmento rojizo que puede evidenciarse para valores de  $a^*$  mayores a cero. Al inicio de los ensayos, las muestras de mortero presentaron una tonalidad rojiza debido a la presencia de

---

<sup>24</sup> FARMER, Neal; BLEW, David. *Fluorescent dye tracer tests and hydrogeology near the malad gorge state park*. p.39.

la rodamina B. Luego de exponerse durante 4 horas a la luz se observó una decoloración considerable en las muestras adicionadas con nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ , característica de la propiedad autolimpiante y descontaminante dada por la actividad fotocatalítica. Sin embargo, las muestras de control sin adición de catalizador (muestras Y1) también presentaron una disminución lenta en la tonalidad del pigmento ( $a^*$ ), aunque no tan pronunciada como se observó en las muestras adicionadas. Esto se debió a que fenómenos no fotocatalíticos participaron en la degradación directa de la rodamina B, como las reacciones de fotólisis o termólisis, debido a la irradiación de luz UV.<sup>25</sup> Por esta razón, para todas las pruebas, se utilizaron muestras de control para evitar la falsa representación de la eficiencia del fotocatalizador.

La figura 28 muestra que, en presencia de materiales fotoactivos, la variación del parámetro  $\Delta a^*$  aumentó con el aumento del tiempo de irradiación. La variación del parámetro  $a^*$  mostró una tendencia logarítmica. Se observó una actividad muy baja para el catalizador con proporción de 3,0% $\text{TiO}_2$ /0,5%Si (muestra Y4), ya que el aumento de la adición del fotocatalizador  $\text{TiO}_2$ , conduce a una menor actividad fotocatalítica, en comparación con muestras con 0,5% a 1,0% de  $\text{TiO}_2$  (muestras Y2 e Y3)

Después de 48 horas de exposición a la luz UV, la degradación de la Rodamina B en los morteros fotoactivos se hace muy evidente en comparación con los estándares (muestra Y1). De acuerdo con la norma UNI 11259, el material ensayado se considera fotocatalítico si el porcentaje de disminución de la intensidad del color del colorante es superior al 20% después de 4 horas. En la figura 28 se observa que la capacidad fotocatalítica de degradación en el mortero permitió una degradación superior al 30% de la rodamina B, para las muestras

---

<sup>25</sup> COHEN RODRÍGUEZ, Juan David, et al. *Evaluación de propiedades fotocatalíticas de cemento adicionado con nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ -xNx (Oxinitruro de Titanio)*. p.42.

Y3, Y4, Y5, Y6 e Y7, lo cual satisface el requisito para 4 horas, para considerarlo un material fotocatalítico.

La tabla del apéndice 3 de datos calculados de color muestra la evolución de la coordenada  $a^*$  sobre  $a_0^*$  de las muestras iluminadas a la luz UV, con los diferentes porcentajes de adición evaluados a diferentes tiempos. A medida que los valores de  $a^*$  tienden a cero significa que la muestra presenta una disminución en su coloración producto de la desaparición de la rodamina B. De esta forma, se observó que las muestras con adición expuestas a radiación UV presentaron una disminución de rodamina B más acelerada que las muestras Y1 de control, lo que demuestra que los procesos fotocatalíticos prevalecieron sobre las reacciones de degradación generadas por la exposición directa del pigmento a la luz.

En la figura 27 la coordenada  $\Delta b^*$  aumenta a medida que transcurre el tiempo de exposición a la luz, indicando la desaparición de la rodamina B, dado que un cambio del color azul al amarillo es mucho más evidente en el caso de las muestras fotoactivas. Así mismo, se evidencia en la figura 25, una tendencia de crecimiento de la coordenada  $\Delta L^*$  como consecuencia de que las muestras están alcanzando su condición inicial sin rodamina B. Este cambio se debe a la mineralización de la rodamina B adsorbida en la superficie del mortero, lo que explica por qué la variación en las muestras sin adición es pequeña comparada con el aumento continuo de la coordenada  $\Delta b^*$  de las muestras fotoactivas, ya que el  $TiO_2$  degrada continuamente los contaminantes y por lo tanto los contaminantes orgánicos parcialmente degradados adsorbidos en la superficie, continúan acumulándose y cambiando el color de la superficie a tonos más amarillos y claros.

Para determinar el grado de degradación que sufrió la rodamina B en las muestras, se calculó el cambio en el color ( $\Delta E$ ), que representa la diferencia espacial entre dos puntos de valores ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) en el sentido Euclidiano. A mayor  $\Delta E$  significa que existe una mayor distancia entre las coordenadas, y por tanto un mayor cambio en el color.<sup>25</sup> Se observa en la figura 30 que el cambio más notable en el color se obtuvo para las muestras con 1,0% de adición de  $\text{TiO}_2$ -0,5%Si (muestra Y3). Para todas las probetas los cambios más significativos en el color se dan durante las primeras 24 horas de exposición a la luz. Es posible que esto se deba al equilibrio adsorción-desorción que se forma en la interfaz entre el semiconductor y el contaminante, ya que la velocidad de desaparición del pigmento depende en parte de que tan rápido se remuevan los productos intermediarios presentes en la superficie del catalizador.

A los 28 días de curado se espera que en las muestras se incremente la aparición de calcita por efecto de carbonatación del  $\text{CO}_2$  en el ambiente y aumenten los productos de la hidratación del cemento alrededor de las nanopartículas, dificultando así la absorción de fotones y disminuyendo, de esta manera, el rendimiento cuántico (número de eventos producidos por fotón absorbido). A pesar de esto, la banda prohibida del  $\text{TiO}_2$  permite la absorción de fotones de baja energía que pueden provenir de la colisión directa con productos hidratados o por absorción previa en el pigmento y posterior transferencia al semiconductor a través de la interfaz.<sup>25</sup>

La decisión de determinar qué formulación es la más adecuada, pasa por el hecho de lograr resultados esperados y no encarecer el proceso de fabricación del producto de mortero. Se determinó que la proporción de 1,0% de  $\text{TiO}_2$ -0,5%Si (muestra Y3) es la óptima del estudio, la cual cumple con los parámetros buscados y la cantidad de materias primas utilizadas no afecta el costo de producción.

En cuanto a los parámetros del color, en principio, con los datos obtenidos y aplicando un análisis de varianza de 95% de confiabilidad ANOVA, se determinó que no existen diferencias significativas entre los parámetros de color  $L^*$  de las muestras de mortero recubrimiento adicionados con nanopartículas de dióxido de titanio  $TiO_2$  y las muestras de mortero de recubrimiento adicionados con  $TiO_2/Si$ . Para el resto de parámetros analizados de color  $a^*$  y  $b^*$ , aplicando análisis de la varianza (ANOVA), se establecieron diferencias significativas.

### **5.3. Respecto al ensayo termogravimétrico (TGA)**

Para el análisis del comportamiento térmico TGA, las pérdidas de masa fueron calculadas utilizando el método de integración del área de pico, las cuales están representadas en las figuras 45-49. Se puede observar una pérdida de la masa entre  $40^\circ C$  y  $450^\circ C$ , debido a la hidrólisis de algunos enlaces presentes en la muestra y a la evaporación de agua residual. La degradación completa ocurre a partir de  $600^\circ C$ . Las muestras se analizaron utilizando el TGA bajo atmósfera inerte ya que la presencia de oxígeno permite a una temperatura superior a  $350^\circ C$ , la oxidación parcial de los grupos de la cadena de sílice en la silicona y la formación de especies como agua.

El análisis termogravimétrico muestra el comportamiento de los componentes del mortero monocapa ultra liso adicionado con diferentes proporciones de  $TiO_2/Si$  con el incremento del calor, las figuras 45-49 presentan una menor pérdida de peso, frente al mortero adicionado solamente con 0,5% de Si (muestra Y8) mostrado en la figura 50. Las moléculas de silano presentes en el polvo de silicona adicionado a las muestras infieren en la pérdida de peso, el cual también está relacionado a la eliminación de moléculas de agua generadas, principalmente, por condensación de grupos silanol, para formar grupos siloxano

y, en menor medida, de las reacciones de condensación de los grupos hidroxilo en las superficies de las nanopartículas de dióxido de titanio.

Análogamente a los termogramas mostrados en las figuras 45-49, pueden distinguirse claramente una pérdida de peso principal en el intervalo de temperaturas entre 600°C-800°C, las muestras Y1, Y2, Y3, Y4 presentan una pérdida de masa muy similar, salvo en la fase de descarbonatación (600°C a 800°C) donde las muestras de mortero ultra liso adicionado, experimentan un aumento significativo de la pérdida de masa. Esto se debe a una adición de filler de caliza a la fórmula del mortero, habitual para mejorar el acabado superficial del mortero de recubrimiento. Las pérdidas de agua de gel se producen en el intervalo 100°C - 400° C y son muy similares entre las muestras analizadas. Las pérdidas de agua de portlandita se producen en el intervalo 400°C - 600°C. Se puede deducir que la adición de TiO<sub>2</sub> no ha contribuido a una mejora de la hidratación.

En el termograma de la figura 50 para la muestra Y8, pueden distinguirse tres pérdidas de peso principales en los intervalos de temperatura siguientes: de la temperatura ambiente a 150 °C, de 350°C a 500 °C y de 500°C a 800°C. La primera pérdida está asociada a un proceso endotérmico, debido a la evaporación del agua de mezcla y humedad fisisorbida, la segunda pérdida de masa registrada corresponde a la eliminación del agua unida más fuertemente a la red inorgánica del mortero de cemento y de restos de rodamina B que se oxidan por efecto de la temperatura y aire circulante. Este resultado indica que la mayor parte de los grupos funcionales que contienen O-Si, se redujeron durante el proceso hidrotérmico, aumentando con ello la estabilidad térmica del compuesto.

En la figura 51 de la muestra Y5 para una adición de 0,5% de  $\text{TiO}_2$ , al observar la derivada, la primera curva corresponde a la pérdida de agua libre del mortero a temperaturas cercanas a los  $100^\circ\text{C}$ . La segunda curva pertenece a la pérdida de agua del gel C-S-H (Silicatos Hidratados). Después aparece otra curva sobre los  $450^\circ\text{C}$  que corresponde a la pérdida del agua que forma la Portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Por último, se calcina la cal del mortero monocapa quedando óxido de cal ( $\text{CaO}$ ). La siguiente curva marcada pertenece a la descomposición de adiciones, a un intervalo de temperaturas aproximado de  $600^\circ\text{C}$  -  $800^\circ\text{C}$ . Por lo anterior, se puede concluir que a mayores temperaturas de calefacción la pérdida de materia producida suele atribuirse fundamentalmente a la condensación de la estructura del  $\text{TiO}_2$  y la consecuente eliminación del agua estructural.

#### **5.4. Respecto al ensayo de ángulo de contacto**

Una gota de líquido puro en un plano de superficie sólida experimenta fuerzas adhesivas que actúan entre el líquido y la superficie sólida que favorecen la propagación, mientras que las fuerzas cohesivas del líquido contra la propagación. El equilibrio entre estas fuerzas determina el ángulo de contacto. El ángulo de contacto entre una gota de agua y la superficie se usó como un indicador de hidrofobicidad o hidrofiliidad. Cuando el ángulo de contacto es mayor que  $90^\circ$ , indica hidrofobicidad, mientras que un ángulo de contacto inferior a  $30^\circ$  indica hidrofiliidad, que es la tendencia de una superficie a mojarse o absorber agua.

En las figuras 36-40 se aprecia una disminución del ángulo de contacto al activar las muestras adicionadas con  $\text{TiO}_2$  con radiación UV. Esto sucede porque

la gota se aferra a la superficie, incrementando el comportamiento hidrofílico.<sup>26</sup> La muestra de referencia Y0 antes de la irradiación UV y después de ella, muestra un comportamiento hidrofílico. La medida de los ángulos de contacto cambia al extender la irradiación UV en el tiempo de las muestras adicionadas con TiO<sub>2</sub>/Si, mientras que en las muestras sin activar las medidas del ángulo de contacto permanecen constantes en el tiempo.

Las muestras con adiciones sin activar han mostrado un comportamiento hidrófobo. En las figuras 31-35 se aprecia claramente cómo aumenta considerablemente el ángulo de contacto de la gota de agua en las muestras adicionadas con TiO<sub>2</sub>/Si sin exposición a la luz UV, provocando así un comportamiento hidrófobo de la superficie de los morteros. Pero mientras estos materiales permanezcan activados por efecto de la radiación UV, cambiará a un comportamiento hidrofílico de la superficie del mortero. La figura 32 corresponde a la muestra Y2 con adiciones de 0,5%TiO<sub>2</sub>/0,5%Si, la que presenta un mayor ángulo de contacto de 94<sup>o</sup>, considerándose como una superficie hidrofóbica.

### **5.5. Respecto al ensayo de absorción de agua por permeabilidad**

La permeabilidad es la propiedad que establece la aptitud de un medio poroso a ser atravesado por un fluido en presencia de un gradiente de presión. Dicho gradiente puede ser originado por diferencia de presiones hidrostáticas o por efectos de las tensiones capilares.<sup>27</sup> La penetración de agua en presencia de un gradiente de presión en las muestras de mortero se evaluó fijando un tubo de Karsten sobre la superficie de la muestra. La absorción de agua por

---

<sup>26</sup> ABELLA RODRÍGUEZ, Gonzalo. *Mejora de las propiedades de materiales a base de cemento que contienen TiO<sub>2</sub>: propiedades autolimpiantes*. 2015. Tesis Doctoral. Caminos.

<sup>27</sup> ICHASO, Agustina. *La permeabilidad al agua como parámetro para evaluar la durabilidad del hormigón-Parte II*. p.8.

permeabilidad se graficó como una función del tiempo en las figuras 41-43, la cual muestra la absorción de agua medida después de 30 minutos para los diferentes bloques. El polvo a base de resina de silicona muestra un rendimiento hidrófobo, lo que provee de protección al mortero contra la entrada de agua. La eficacia de la propiedad hidrófoba se manifiesta por el aumento de la cantidad de agua repelida respecto a la muestra Y1 sin adiciones.

La permeabilidad de los morteros estudiados se evaluó a una edad de 14 y 28 días de elaborados (figura 43). Se obtuvieron mejores resultados para 28 días, debido a que las características de porosidad que presenta el mortero a tal edad son mayores. Este es el resultado de que toda el agua necesaria para la reacción química entre el agua y el cemento se ha evaporado. Según la figura 43, la muestra Y4 con 3,0%TiO<sub>2</sub>/0,5%Si fue menos permeable, seguida por la muestra de mortero Y8 con 0,5%Si. La muestra Y1 sin adiciones presentó mayor permeabilidad al agua. Se midió la cantidad de agua que absorbe un mortero, de lo cual se obtuvo como parámetro satisfactorio un resultado de al menos 72% al 78% de repelencia. Según lo analizado, la muestra Y1 sin adición de polvo de silicona posee un 56% de impermeabilidad al agua. Cuanto más permeable sea el mortero, menor será su durabilidad; ya que un mortero permeable es propenso a su desintegración, porque el agua que penetra en sus poros se expande sometándolo a tensiones que no puede soportar, por lo que, la reducción de la permeabilidad es una manera efectiva para mejorar la durabilidad del mortero.

## **5.6. Respecto al ensayo de absorción de agua por capilaridad**

Dadas las características del sistema de poros de la estructura del mortero, los fenómenos capilares tienen una influencia significativa en los mecanismos de transporte. La absorción capilar es el mecanismo de transferencia de líquidos más rápido, y la determinación de la capacidad de

absorción capilar constituye una herramienta confiable para caracterizar la estructura de poros en forma comparativa. <sup>27</sup>

La capacidad de succión capilar de cada probeta, en  $\text{g/m}^2$ , es el valor del incremento de masa por unidad de área de la sección transversal de la probeta, en el instante de lectura (t), cuando la variación de masa es menor que 0,1% entre dos determinaciones sucesivas de la masa húmeda. Cuando el transporte de líquidos en sólidos porosos se debe a la tensión superficial que actúa en los capilares, el transporte del líquido está influenciado por las características del mismo (viscosidad, densidad y tensión superficial) y por las características del sólido poroso (permeabilidad, estructura de poros, energía superficial).

En la figura 44, se puede observar la capacidad de succión capilar, la muestra que tiene mayor incremento de masa de agua por succión capilar es la Y1, mientras que las que tienen menor capacidad de succión capilar son las muestras Y3, Y4 e Y8, siendo estas últimas las más hidrófobas. Este hecho puede atribuirse a que los morteros adicionados con silicona presentan absorciones menores a las de los morteros de referencia Y1, dado que los primeros están constituidos por partículas de resina de silicona a base de siloxano haciendo al mortero resultante mucho menos permeable, poroso y absorbente.

Por lo tanto, en este estudio de las propiedades fotocatalíticas e hidrofóbicas para un mortero de recubrimiento con textura lisa adicionado con nanopartículas de dióxido de titanio y silicona de polisiloxano, se determinó que las condiciones de actividad fotocatalítica para proporcionar el efecto de autolimpieza y propiedades hidrofóbicas óptimas, corresponden a la adición de 1,0% de dióxido de titanio y 0,5% de silicona de polixilosano.



## CONCLUSIONES

1. Se demostró que los morteros que contienen  $\text{TiO}_2\text{-Si}$  presentan propiedades autolimpiantes por la degradación de la rodamina B, inducida por el efecto fotocatalítico del  $\text{TiO}_2$ . Así mismo, le confiere propiedades humectantes que favorecen la limpieza de partículas sueltas con el agua de lluvia.
2. El dióxido de titanio presentó una mezcla de fases cristalinas, una minoría pertenece a la fase rutilo y la otra mayoría pertenece a la fase anatasa, observando un tamaño de partículas entre 1-150 nm.
3. Mediante el análisis TGA se demostró que, a mayores temperaturas de calefacción de las muestras de mortero, la pérdida de materia producida suele atribuirse fundamentalmente a la condensación de la estructura del  $\text{TiO}_2$  y la consecuente eliminación del agua estructural. La adición de  $\text{TiO}_2$  no contribuye a una mejora de la hidratación del mortero de cemento.
4. La degradación de la rodamina B en las muestras adicionadas expuestas a la luz UV aumentó en función del tiempo, evidenciándose el efecto autolimpiante que genera la actividad fotocatalítica de las nanopartículas de dióxido de titanio en el mortero de cemento.
5. Se evidenció que las muestras adicionadas con nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{TiO}_2$  presentan actividad fotocatalítica al degradar la rodamina B a edades tempranas de curado y bajo irradiación con luz UV, siendo las probetas con adición de 1,0% $\text{TiO}_2$ -0,5%Si las que presentan mayor eficiencia.

6. Las probetas adicionadas con 1,0% de  $\text{TiO}_2$  fueron capaces de aprovechar fotones de baja energía para llevar a cabo la fotocatalisis, lo que les permitió obtener resultados destacados de mineralización del contaminante aún a 28 días de curado en luz UV.
7. Se aprecia una disminución del ángulo de contacto al activar las muestras adicionadas con  $\text{TiO}_2$ -Si con radiación UV, debido a la reducción de la tensión superficial.
8. Los morteros con nanopartículas de dióxido de titanio (1,0% $\text{TiO}_2$ /0,5%Si) presentan una menor capacidad de absorción del agua.
9. La adición de  $\text{TiO}_2$ -Si en un principio provoca un comportamiento hidrófobo de la superficie de los materiales que lo contienen. Pero mientras estos materiales permanezcan activados por efecto de la radiación UV, cambiará a un comportamiento hidrofílico de la superficie.
10. En las diferentes muestras de mortero, las capacidades de succión capilar se incrementan con el aumento de las adiciones de  $\text{TiO}_2$ -Si.

## RECOMENDACIONES

1. Evaluar la actividad fotocatalítica, en materiales de construcción mediante la degradación de contaminantes atmosféricos, como el NO<sub>x</sub>.
2. Formular modelos cinéticos que predigan el comportamiento de la eliminación de contaminantes en una matriz cementante.
3. Estudiar la influencia de la relación agua/cemento en las propiedades fotocatalíticas autolimpiantes.
4. Aumentar la concentración de la rodamina B en solución, para obtener mayores valores iniciales de las coordenadas de color CIEL\*a\*b\*.
5. Prolongar el ensayo de autolimpieza durante más tiempo, para observar el comportamiento de actividad fotocatalítica de los morteros de cemento a largo plazo.
6. Evaluar el ensayo de autolimpieza en morteros en escala real con irradiación solar y variabilidad de las condiciones atmosféricas.
7. Estudiar una mayor variedad de morteros de cemento, para ver realmente cuál es el más efectivo.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ABELLA RODRÍGUEZ, Gonzalo. *Mejora de las propiedades de materiales a base de cemento que contienen  $TiO_2$ : propiedades autolimpiantes*. Tesis Doctoral Caminos. 2015. 79 p.
2. ADALSTEINSSON, T. *Principles for Thermogravimetric Analysis (TGA)*. 2008. [en línea]. <<http://webpages.scu.edu/ftp/adalsteinsson/GroupSite/Methods/DSCinfo/page30/page30.html>> [Consulta: julio 2017]
3. AGUILAR Bazignan, Ana María Marcela. *Evaluación técnico ambiental del dióxido de titanio ( $TiO_2$ ) en los morteros de cemento chilenos*. Trabajo de graduación del magíster en hábitat sustentable y eficiencia energética. Universidad de del Bío-Bío. Chile, 2013. 80 p.
4. ARRECHEA Alvarado, Marlene Susana. *Evaluación de tres adsorbentes para la reducción del porcentaje de sólidos totales en la recuperación de la mezcla de acetato de etilo/alcohol etílico, en el proceso de limpieza de equipo, en la industria gráfica*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 212 p.
5. ASLAN, Aysegul Basak. *Evaluation of test methodologies and self-cleaning performances of  $TiO_2$  containing construction materials*. 2014. 114 p.

6. BRASLAVSKY, Silvia E. *Glossary of terms used in photochemistry. (IUPAC Recommendations 2006)*. Pure and Applied Chemistry, 2007, vol. 79, no 3, 465 p.
7. CARDENAS RAMIREZ, Carolina. *Evaluación de las propiedades físicas y fotocatalíticas de cemento adicionado con nanopartículas de dióxido de titanio*. Tesis. Universidad Nacional de Colombia. 2012. 90 p.
8. CASTILLO Rodríguez F.D *Introduction to nanomaterials*. UNAM. México, Cuautitlán Izcalli. 2012. 82 p.
9. CENANO Latinoamérica. [en línea]. <[www.cenano-la.com/angulo-de-contacto.html](http://www.cenano-la.com/angulo-de-contacto.html)> [Consulta: septiembre de 2016]
10. CHAUDHRY, Qasim; CASTLE, Laurence; WATKINS, Richard (ed.). *Nanotechnologies in food*. Royal Society of Chemistry, 2017. 19 p.
11. COHEN RODRÍGUEZ, Juan David, et al. *Evaluación de propiedades fotocatalíticas de cemento adicionado con nanopartículas de TiO<sub>2</sub>-xNx (Oxinitruro de Titanio)*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. 150 p.
12. CORZO Dardón, Claudia Carolina. *Evaluación de las reacciones de hidratación y puzolánica del cemento Portland con incorporación de puzolana natural y cal mediante termogravimetría y microscopía electrónica de barrido*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2013. 239 p.

13. DIEBOLD, U. *The Surface Science of Titanium Dioxide*. Surf. Sci. Department of Physics, Tulane University, New Orleans, USA Report 48, 53. 2003. 53 p.
14. EL FARO NANOTECNOLÓGICO. *Nanómetro*. [en línea]. <<http://elfaronanotec.blogspot.com/2016>> [Consulta: julio de 2017]
15. FARALDOS, M., et al. *Photocatalytic hydrophobic concrete coatings to combat air pollution*. Catalysis Today, 2016, vol. 259, 9 p.
16. FARMER, Neal; BLEW, David. *Fluorescent dye tracer tests and hydrogeology near the malad gorge state park*. 2010. 41 p.
17. FERNÁNDEZ CAÑETE, Agustín, et al. *Estudio de la hidrofobicidad y autolimpieza en materiales con nanotratamientos superficiales*. 2013. 6 p.
18. FLORES-VIVIAN, Ismael, et al. *Self-assembling particle-siloxane coatings for superhydrophobic concrete*. ACS applied materials & interfaces, 2013, vol. 5, no 24, 11 p.
19. FUJISHIMA, Akira. *Photosensitized electrolytic oxidation on semiconducting n-type TiO<sub>2</sub> electrode*. vol. 72, 1969, 113 p.
20. GARCIA, Lucia. *Materiales fotocatalíticos y sus aplicaciones en construcción*. 2016. 83 p.

21. GARRIGA I CABO, Cristina. *Estrategias de optimización de procesos de descontaminación de efluentes acuosos y gaseosos mediante fotocátalisis heterogénea*. 2007. 31 p.
22. GLAZE. W. H. *Environmental Science and Technology* 21. 1987. 230 p.
23. GÓMEZ JIMÉNEZ, Virginia; IRUSTA, Silvia; SANTAMARÍA REMIRO, Jesús. *Aerosoles formados por nanomateriales: Monitorización y evaluación de la exposición en entornos laborales*. Tesis Doctoral PhD. Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente. Universidad de Zaragoza. 2014. 270 p.
24. GREßLER, S.; Fiedeler, U.; Simkó, M.; GAZSÓ, A.; NENTWICH, M. *Self-cleaning, dirt and water-repellent coatings on the basis of nanotechnology*. No. 20. 2010, [en línea], <[http://epub.oeaw.ac.at/0xc1aa500d\\_0x0024fa56.pdf](http://epub.oeaw.ac.at/0xc1aa500d_0x0024fa56.pdf)> [Consulta: 19 de septiembre de 2016.].
25. GUERRA, Valentina. *Attività fotocatalitica del biossido di titanio applicato ai materiali da costruzione. Analisi delle prestazioni in funzione della tipologia di supporto e della tecnica di deposizione*. Tesis Doctoral. 2014. 114 p.
26. GUERRERO GARCÍA, José Luis. *Diseño y evaluación de un mortero fino tipo repello con acabado alisado y propiedades de hidrofobicidad para una empresa de acabados de la construcción*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 103 p.

27. GUO, X. L., et al. *Developments of bionic polymers*. Progress in Chemistry, vol. 16, no 6, 2004, 1029 p.
28. ICHASO, Agustina. *La permeabilidad al agua como parámetro para evaluar la durabilidad del hormigón-Parte II*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2014. 120 p.
29. ISMAIL, Adel A.; HAKKI, Amer; BAHNEMANN, Detlef W. *Mesostructure Au/TiO<sub>2</sub> nanocomposites for highly efficient catalytic reduction of p-nitrophenol*. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, vol. 358, 2012, 151 p.
30. JARAMILLO PAEZ, César Augusto y TABORDA CAMPO, Gonzalo. *La fotocatalisis: aspectos fundamentales para una buena remoción de contaminantes*. Revista Universidad de Caldas. Enero-diciembre 2006. 80 p.
31. LAVIS, J. M. R. E. Maleczka, Jr. *Polymethylhydrosiloxane*. Encyclopedia of Reagents for Organic Synthesis, John Wiley & Sons. 2003. 221 p.
32. LECOMTE, Jean-Paul. *Mortar protection. New silicone resin-based hydrophobic powder for the dry mix market*. European Coatings Journal. 2013. 88 p.
33. LEROY MERLIN. *Dosificar y preparar hormigón*. 2002. España. 6 p.

34. MERONI, D., et al. *Interplay between chemistry and texture in hydrophobic TiO<sub>2</sub> hybrids*. The Journal of Physical Chemistry C, 2011, vol. 115, no 38, 10 p.
35. MILANESI, F., et al. *Siloxane-TiO<sub>2</sub> Hybrid Nanocomposites. The Structure of the Hydrophobic Layer*. The Journal of Physical Chemistry C, vol. 114, no 18, 2010, 7 p.
36. OLLEROS, Jaime Carbajo. *Aplicación de la fotocatalisis solar a la degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa con catalizadores nanoestructurados de TiO<sub>2</sub>*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid. 2013. 277 p.
37. PRIETO Mahaney Orlando, *Estudio sobre las dependencias intrínsecas de las actividades fotocatalíticas sobre las propiedades estructurales y físicas de fotocatalizadores de óxido de titanio (IV)*. Universidad de Hokkaido, 2009. 5 p.
38. QUANTOTEC. *Color, luz y colorimetría*. España. [en línea]. <<http://www.quantotec.com/sp/Colorimetria.htm>.> [Consulta: julio de 2017]
39. QUIROZ GAITÁN, Heiddy Paola, et al. *Preparación y estudio de las propiedades estructurales, ópticas y morfológicas de nanotubos de TiO<sub>2</sub> para su aplicación en sensores ópticos*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia. 2012. 112 p.

40. RODAS Morán, Andrea Eunice. *Compilación monográfica de información acerca de un proyecto de desarrollo científico y tecnológico de la nanotecnología en Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 2008. 254 p.
41. RODRÍGUEZ GARCÍA, José Rubén. *Morteros fotocatalíticos: análisis de su autolimpieza en función del tipo de cemento y rugosidad superficial*. Tesis Doctoral. 2012. 155 p.
42. RODRÍGUEZ PÉREZ, Iván, et al. *Propuestas de funcionalidades avanzadas en un aplacado de fachada*. 2012. 71 p.
43. ROMANI, Ambra. *Graphene oxide as a cement reinforcing additive*. Estudio preliminar. 2015. 138 p.
44. SABÁ MEDRANO, Carlos Eduardo. *Evaluación de la incidencia de la cal en las propiedades físico-mecánicas de tres tipos de mortero de albañilería*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006. 125 p.
45. SALMON, Lynn G.; CASS, Glen R. *The fading of artists' colorants by exposure to atmospheric nitric acid*. *Studies in Conservation*, vol. 38, no 2, 1993, 91 p.
46. SÁNCHEZ, Hoover. *Degradación de resorcinol por fotocatalisis heterogénea usando  $TiO_2$  y  $H_2O_2$* . *Scientia Et Technica*, vol. 2, no 50, 2012, 196 p.

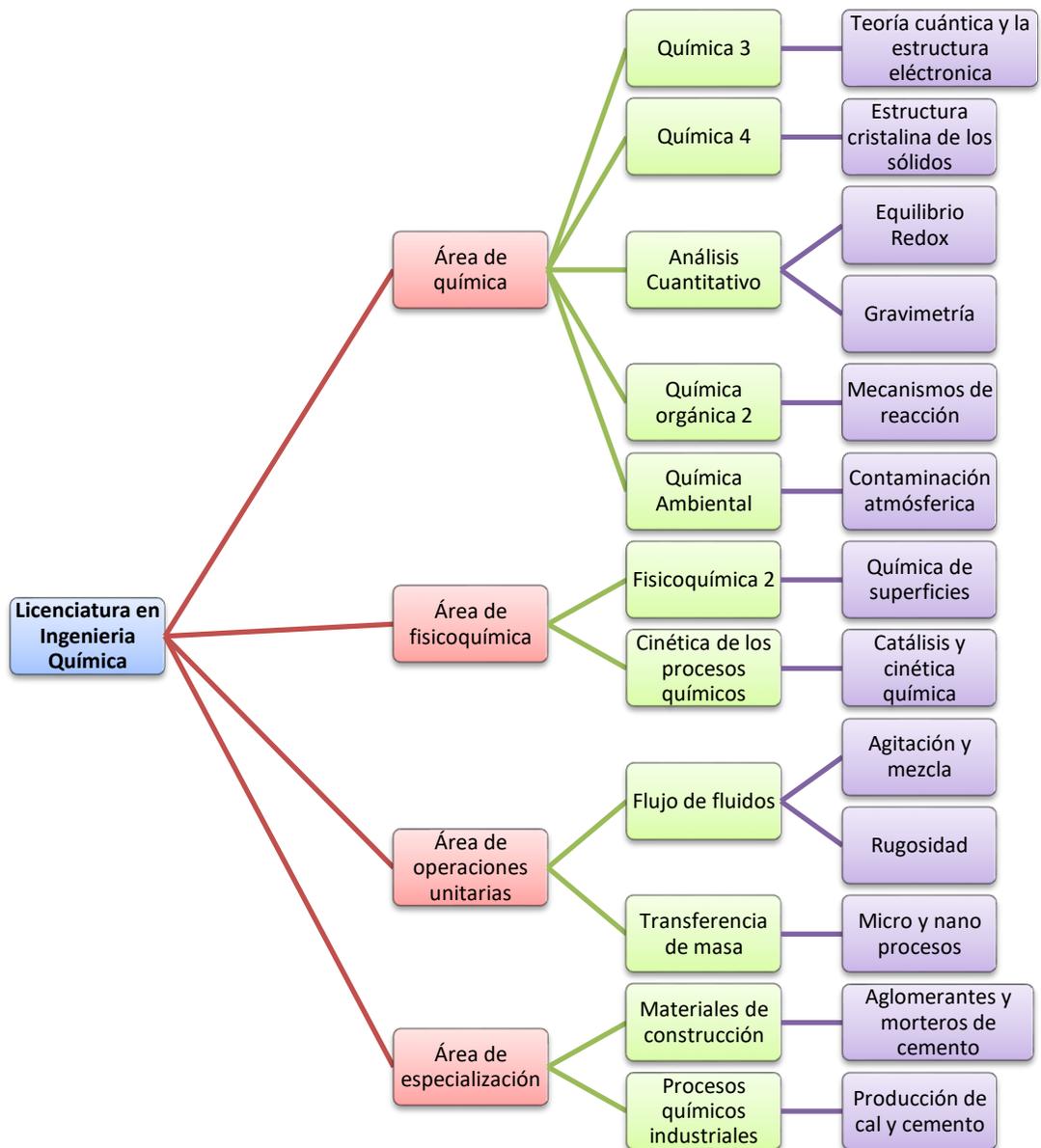
47. SIÑERIZ MARTÍNEZ, María. *Aplicaciones arquitectónicas de los nanomateriales en base de titanio. Envoltentes fotocatalíticas*. ETSAM. 2015. 9 p.
48. SKOOG, Douglas. *Principios de análisis instrumental*. 5a ed. España: McGraw-Hill, 1992. 1024 p.
49. TOBÓN, Jorge Iván. *Determination of optimum parameters in high resolution thermogravimetric analysis of cementitious materials*. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetric*, vol 207, núm. 1, 2012, 239 p.
50. UNE-EN 196-1:2005 - *Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas*. España, 2005. 36 p.
51. UNI 11259:2016 *Determination of the photocatalytic activity of hydraulic binders: rodamina test method*. Milán: UNI 2016. 12 p.
52. UNOI - Unidad de Orientación Empresarial en Innovación. *Mortero Fotocatalítico*. [en línea]. <<http://enclave.cev.es/unoi/mortero-fotocatalitico>> [Consulta: julio de 2017]
53. VALDEZ ALVARADO, Aldo R. *Simulación en nanotecnología*. *Revista de Información, Tecnología y Sociedad*, 2010, 41 p.
54. VALENCIA CABALLERO, Daniel, et al. *Aplicaciones de films y nanocoatings como mejora activa y pasiva en la integración fotovoltaica en edificios*. 2013. 72 p.

55. VELASCO, Leticia F.; ANIA, Conchi O. *Materiales de carbono en fotocatalisis*. Boletín del Grupo Español del Carbón, 2011, No. 21, 5 p.
56. VIGIL, E. L. *Journal of materials science letters*, 18, 1999. 1069 p.
57. WAGNER, C. *El Tubo Karsten, un sistema sencillo para estimar la Absorción de Humedad por parte de los materiales de construcción*. Revista Bit No. 19. 2000. 499 p.
58. WALPOLE, RONALD, E.; HYERS, RAYMOND, H. *Probabilidad y estadística*. McGraw Hill, 1994. 515 p.
59. WESTLAND, S. *Diagramas de cromaticidad*. 2001 [en línea]. <[http://www.gusgsm.com/espacio\\_color\\_cie\\_lab](http://www.gusgsm.com/espacio_color_cie_lab)> [Consulta: julio 2017]
60. ZHOU, Shuxue; DING, Xiaofeng; WU, Limin. *Fabrication of ambient-curable superhydrophobic fluoropolysiloxane/TiO<sub>2</sub> nanocomposite coatings with good mechanical properties and durability*. Progress in Organic Coatings, 2013, vol. 76, No 4, 570 p.



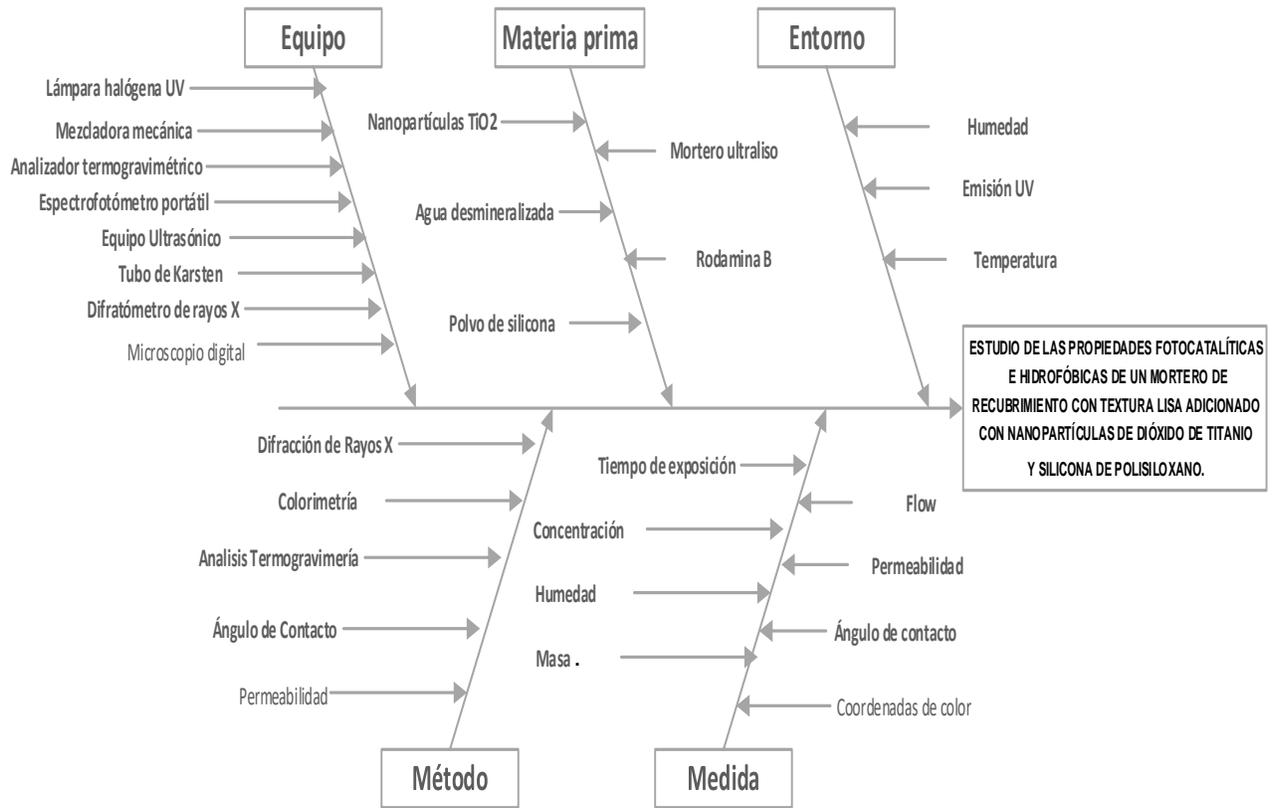
# APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Datos originales**

**Datos experimentales de color en escala cieL\*a\*b\* para muestras con adición de TiO<sub>2</sub> y Si**

Tiempo de exposición (h)	% TiO <sub>2</sub> -Si	Muestra	L*	a*	b*
0	0/0	Y1	85,96	12,44	-2,10
4	0/0	Y1	87,35	9,92	-0,81
26	0/0	Y1	90,46	5,24	1,57
48	0/0	Y1	91,39	4,11	1,96
72	0/0	Y1	91,87	3,41	2,20
168	0/0	Y1	92,91	1,98	2,42
336	0/0	Y1	93,39	1,20	2,23
504	0/0	Y1	93,72	0,91	2,07
672	0/0	Y1	93,84	0,78	2,20
0	0,5-0,5	Y2	83,44	11,53	-0,72
4	0,5-0,5	Y2	84,30	9,53	0,70
26	0,5-0,5	Y2	88,20	6,40	2,34
48	0,5-0,5	Y2	90,80	3,66	2,85
72	0,5-0,5	Y2	92,52	2,40	2,66
168	0,5-0,5	Y2	93,30	1,45	2,99
336	0,5-0,5	Y2	93,50	1,07	3,07
504	0,5-0,5	Y2	93,66	0,94	3,22
672	0,5-0,5	Y2	93,54	0,80	3,40
0	1,0-0,5	Y3	83,10	12,62	-1,49
4	1,0-0,5	Y3	84,92	8,91	1,41
26	1,0-0,5	Y3	87,60	6,68	2,70
48	1,0-0,5	Y3	90,28	4,28	3,52
72	1,0-0,5	Y3	91,82	2,83	3,40
168	1,0-0,5	Y3	92,72	1,69	3,60
336	1,0-0,5	Y3	93,03	1,12	3,90
504	1,0-0,5	Y3	93,08	0,98	4,15
672	1,0-0,5	Y3	93,19	0,81	4,30
0	3,0-0,5	Y4	84,66	10,63	-1,50
4	3,0-0,5	Y4	86,41	7,60	1,31

Continuación tabla anterior.

26	3,0-0,5	Y4	87,87	6,58	2,03
48	3,0-0,5	Y4	89,50	5,05	3,02
72	3,0-0,5	Y4	91,10	3,88	3,58
168	3,0-0,5	Y4	92,59	2,02	3,69
336	3,0-0,5	Y4	92,96	1,16	4,23
504	3,0-0,5	Y4	93,06	0,99	4,76
672	3,0-0,5	Y4	93,20	0,79	5,16
0	0,5-0	Y5	85,76	12,19	-1,71
4	0,5-0	Y5	87,99	8,74	0,06
26	0,5-0	Y5	90,81	5,40	1,35
48	0,5-0	Y5	92,19	3,73	1,72
72	0,5-0	Y5	93,04	2,00	2,03
168	0,5-0	Y5	93,74	1,45	2,09
336	0,5-0	Y5	93,95	0,83	2,33
504	0,5-0	Y5	94,23	0,66	3,20
672	0,5-0	Y5	94,07	0,55	2,60
0	1-0	Y6	86,13	10,93	-1,29
4	1-0	Y6	88,06	7,60	0,44
26	1-0	Y6	90,74	4,80	1,46
48	1-0	Y6	91,76	3,20	1,82
72	1-0	Y6	92,52	2,01	1,90
168	1-0	Y6	93,11	1,10	2,22
336	1-0	Y6	93,26	0,71	2,53
504	1-0	Y6	93,41	0,57	2,72
672	1-0	Y6	93,43	0,48	2,76
0	3-0	Y7	86,40	10,67	-1,35
4	3-0	Y7	88,53	6,72	0,89
26	3-0	Y7	91,16	4,74	1,63
48	3-0	Y7	92,30	3,46	1,97
72	3-0	Y7	93,38	2,14	2,02
168	3-0	Y7	93,53	1,38	2,66
336	3-0	Y7	93,90	0,79	3,20
504	3-0	Y7	93,89	0,64	3,33
672	3-0	Y7	93,45	0,52	3,34

Fuente: elaboración propia.

### Absorción de agua a los 14 días

Absorción de agua (ml)						
Muestra	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
Y1	0,07	0,10	0,12	0,18	0,20	0,22
Y2	0,00	0,01	0,05	0,10	0,10	0,12
Y3	0,07	0,10	0,10	0,15	0,20	0,20
Y4	0,00	0,01	0,05	0,10	0,10	0,12
Y8	0,00	0,01	0,05	0,10	0,10	0,10

Fuente: elaboración propia.

### Absorción de agua a los 28 días

Absorción de agua (ml)						
Muestra	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min
Y1	0,60	1,05	1,50	1,90	2,40	2,80
Y2	0,30	0,60	0,90	1,10	1,40	1,70
Y3	0,30	0,60	0,80	1,00	1,30	1,55
Y4	0,20	0,50	0,70	0,90	1,10	1,30
Y8	0,30	0,50	0,80	1,10	1,30	1,50

Fuente: elaboración propia.

### Porcentaje de permeabilidad

Muestra	Permeabilidad (mL/min)	% Permeabilidad	% Repelencia	Altura de columna de agua (mL)	Tiempo (min)
Y1	0,093	44,00	56,00	2,80	30,000
Y2	0,057	28,00	72,00	1,70	30,000
Y3	0,052	25,00	75,00	1,55	30,000
Y4	0,043	22,00	78,00	1,30	30,000
Y5	0,050	24,00	76,00	1,50	30,000

Fuente: elaboración propia.

### Absorción de agua por capilaridad

Tiempo (h)	Masa de las muestras (g)				
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5
0,0	156,11	158,78	160,65	161,99	155,58
0,1	160,54	162,75	164,32	165,95	159,99
0,2	162,25	164,55	166,17	167,33	161,12
0,3	164,10	166,09	167,40	168,52	162,06
0,5	167,65	168,36	169,31	170,27	163,59
1,0	173,41	172,30	172,57	172,84	165,86
2,0	181,99	179,79	178,87	175,67	168,71
3,0	188,78	183,22	181,41	177,82	170,98
4,0	193,27	184,99	182,71	179,08	172,25
6,0	201,02	188,48	185,31	181,58	174,88
24,0	205,61	202,37	193,89	190,20	184,17
48,0	206,02	204,03	199,23	196,61	191,28
72,0	206,20	204,45	201,38	200,01	194,00
96,0	206,29	204,70	202,01	200,86	194,59
168,0	206,42	205,12	202,92	202,12	195,14
216,0	206,58	205,15	203,02	202,33	195,30

Fuente: elaboración propia.

### Incremento de masa por área mediante el ensayo de absorción capilar

Tiempo (h)	Incremento de masa por unidad de área (g/m <sup>2</sup> )				
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y8
0,0	0	0,00	0,00	0,00	0
0,1	1 772	1 588	1 468	1 584	1 764
0,2	2 456	2 308	2 208	2 136	2 216
0,3	3 196	2 924	2 700	2 612	2 592
0,5	4 616	3 832	3 464	3 312	3 204
1,0	6 920	5 408	4 768	4 340	4 112
2,0	10 352	8 404	7 288	5 472	5 252
3,0	13 068	9 776	8 304	6 332	6 160
4,0	14 864	10 484	8 824	6 836	6 668
6,0	17 964	11 880	9 864	7 836	7 720
24,0	19 800	17 436	13 296	11 284	11 436
48,0	19 964	18 100	15 432	13 848	14 280
72,0	20 036	18 268	16 292	15 208	15 368
96,0	20 072	18 368	16 544	15 548	15 604
168,0	20 124	18 536	16 908	16 052	15 824
216,0	20 188	18 548	16 948	16 136	15 888

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Datos calculados de las coordenadas Ciel\*a\*b\*

Tiempo de exposición (h)	% TiO <sub>2</sub> -Si	Muestra	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$	%a*	$\Delta E$	%L*
0	0/0	Y1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0/0	Y1	1,39	2,51	1,29	20,22	3,15	1,61
26	0/0	Y1	4,49	7,20	3,67	57,89	9,25	5,22
48	0/0	Y1	5,43	8,33	4,06	66,98	10,74	6,31
72	0/0	Y1	5,91	9,03	4,30	72,60	11,61	6,87
168	0/0	Y1	6,94	10,46	4,52	84,10	13,34	8,08
336	0/0	Y1	7,42	11,24	4,33	90,36	14,15	8,64
504	0/0	Y1	7,75	11,53	4,17	92,72	14,51	9,02
672	0/0	Y1	7,88	11,66	4,30	93,75	14,72	9,16
0	0,5-0,5	Y2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,5-0,5	Y2	0,86	2,00	1,42	17,38	2,60	1,04
26	0,5-0,5	Y2	4,77	5,13	3,06	44,46	7,64	5,71
48	0,5-0,5	Y2	7,36	7,87	3,57	68,26	11,35	8,82
72	0,5-0,5	Y2	9,08	9,13	3,38	79,20	13,32	10,89
168	0,5-0,5	Y2	9,86	10,08	3,71	87,41	14,58	11,82
336	0,5-0,5	Y2	10,06	10,46	3,79	90,70	15,00	12,06
504	0,5-0,5	Y2	10,23	10,59	3,94	91,86	15,24	12,26
672	0,5-0,5	Y2	10,10	10,73	4,12	93,08	15,30	12,11
0	1,0-0,5	Y3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	1,0-0,5	Y3	1,82	3,71	2,90	29,36	5,04	2,18
26	1,0-0,5	Y3	4,50	5,93	4,19	47,03	8,55	5,42
48	1,0-0,5	Y3	7,17	8,34	5,01	66,11	12,09	8,63
72	1,0-0,5	Y3	8,72	9,79	4,90	77,58	13,99	10,49
168	1,0-0,5	Y3	9,62	10,93	5,10	86,64	15,43	11,57
336	1,0-0,5	Y3	9,93	11,50	5,39	91,10	16,12	11,95
504	1,0-0,5	Y3	9,98	11,64	5,64	92,23	16,34	12,01
672	1,0-0,5	Y3	10,09	11,81	5,79	93,56	16,58	12,15

Continuación apéndice 4.

<b>0</b>	3,0-0,5	Y4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>4</b>	3,0-0,5	Y4	1,74	3,03	2,81	28,47	4,48	2,06
<b>26</b>	3,0-0,5	Y4	3,20	4,05	3,53	38,12	6,26	3,78
<b>48</b>	3,0-0,5	Y4	4,83	5,58	4,52	52,52	8,66	5,71
<b>72</b>	3,0-0,5	Y4	6,43	6,74	5,08	63,46	10,61	7,60
<b>168</b>	3,0-0,5	Y4	7,93	8,61	5,19	81,01	12,80	9,37
<b>336</b>	3,0-0,5	Y4	8,30	9,46	5,73	89,07	13,83	9,80
<b>504</b>	3,0-0,5	Y4	8,39	9,64	6,26	90,71	14,23	9,91
<b>672</b>	3,0-0,5	Y4	8,54	9,84	6,66	92,58	14,63	10,09
<b>0</b>	0,5-0	Y5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>4</b>	0,5-0	Y5	2,23	3,45	1,77	28,33	4,48	2,60
<b>26</b>	0,5-0	Y5	5,05	6,80	3,06	55,75	9,01	5,89
<b>48</b>	0,5-0	Y5	6,44	8,47	3,43	69,45	11,18	7,51
<b>72</b>	0,5-0	Y5	7,28	10,19	3,74	83,56	13,07	8,49
<b>168</b>	0,5-0	Y5	7,99	10,75	3,81	88,14	13,92	9,31
<b>336</b>	0,5-0	Y5	8,20	11,36	4,04	93,17	14,58	9,56
<b>504</b>	0,5-0	Y5	8,48	11,54	4,92	94,62	15,14	9,88
<b>672</b>	0,5-0	Y5	8,32	11,65	4,31	95,53	14,95	9,70
<b>0</b>	1-0	Y6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>4</b>	1-0	Y6	1,93	3,33	1,73	30,47	4,22	2,24
<b>26</b>	1-0	Y6	4,61	6,13	2,74	56,11	8,15	5,36
<b>48</b>	1-0	Y6	5,63	7,73	3,11	70,74	10,06	6,54
<b>72</b>	1-0	Y6	6,40	8,92	3,19	81,58	11,43	7,43
<b>168</b>	1-0	Y6	6,98	9,84	3,51	89,98	12,56	8,10
<b>336</b>	1-0	Y6	7,13	10,22	3,81	93,51	13,04	8,28
<b>504</b>	1-0	Y6	7,28	10,36	4,01	94,80	13,29	8,46
<b>672</b>	1-0	Y6	7,30	10,45	4,05	95,64	13,38	8,47
<b>0</b>	3-0	Y7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>4</b>	3-0	Y7	2,13	3,95	2,24	36,98	5,01	2,46
<b>26</b>	3-0	Y7	4,76	5,93	2,97	55,58	8,17	5,51
<b>48</b>	3-0	Y7	5,89	7,21	3,32	67,55	9,88	6,82
<b>72</b>	3-0	Y7	6,97	8,53	3,37	79,93	11,52	8,07
<b>168</b>	3-0	Y7	7,13	9,29	4,01	87,04	12,38	8,25
<b>336</b>	3-0	Y7	7,50	9,88	4,55	92,56	13,21	8,68
<b>504</b>	3-0	Y7	7,49	10,03	4,68	94,02	13,36	8,66
<b>672</b>	3-0	Y7	7,05	10,15	4,68	95,11	13,21	8,16

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 5. Análisis de error

Empleando un análisis de varianzas de un factor con un nivel de significancia de 0,05 se buscó probar la siguiente hipótesis:

**H<sub>0</sub>:** No existe diferencia significativa entre los valores de L\*, a\*, b\* para las muestras de mortero de recubrimiento adicionados con nanopartículas de dióxido de titanio TiO<sub>2</sub> y las muestras de mortero de recubrimiento adicionados con TiO<sub>2</sub>/Si.

**H<sub>1</sub>:** Existe diferencia significativa entre los valores de L\*, a\*, b\* para las muestras de mortero de recubrimiento adicionados con nanopartículas de dióxido de titanio TiO<sub>2</sub> y las muestras de mortero de recubrimiento adicionados con TiO<sub>2</sub>/Si.

### Análisis de varianza para L\* de la muestra Y0

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Tiempo de exposición (h)	9	1 830	203,333	60 350
L*	9	820,881	91,209	8,033

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	56 573,397	1	56 573,397	1,874	0,189	4,493
Dentro de los grupos	482 864,268	16	30 179,016			
Total	539 437,666	17				

Fuente: elaboración propia.

Basado en la prueba de Fisher, se concluye:

$$f_{calculada}(1,874) < f_{teórica}(4,493): \text{Ho se acepta}$$

### Análisis de varianza para L\* de la muestra Y1

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	8	1 830	228,75	62 326,785
83,435	8	729,813	91,226	11,388

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	75 650,623	1	75 650,623	2,427	0,141	4,600
Dentro de los grupos	436 367,222	14	31 169,087			
Total	512 017,845	15				

Fuente: elaboración propia.

Con base en la prueba de Fisher, se concluye:

$$f_{calculada}(2,427) < f_{teórica}(4,600): \text{Ho se acepta.}$$

### Análisis de varianza para L\* de la muestra Y2

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	8	1 830	228,75	62 326,785
83,100	8	726,638	90,829	9,392

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	76 087,889	1	76 087,889	2,441	0,140	4,600
Dentro de los grupos	436 353,249	14	31 168,089			
Total	512 441,139	15				

Fuente: elaboración propia.

Basado en la prueba de Fisher, se concluye:

$$f_{calculada}(2,441) < f_{teórica}(4,600): \text{Ho se acepta.}$$

### Análisis de varianza para L\* de la muestra Y3

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	8	1 830	228,75	62 326,785
84,664	8	726,685	90,835	6,920

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	76 081,499	1	76 081,499	2,441	0,140	4,600
Dentro de los grupos	436 335,943	14	31 166,853			
Total	512 417,442	15				

Fuente: elaboración propia.

Con base en la prueba de Fisher, se concluye:

$$f_{calculada}(2,441) < f_{teórica}(4,600): \text{Ho se acepta.}$$

### Análisis de varianza para L\* de la muestra Y4

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	8	1 830	228,75	62 326,785
85,755	8	740,016	92,502	4,675

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	74 253,979	1	74 253,979	2,382	0,144	4,600
Dentro de los grupos	436 320,231	14	31 165,730			
Total	510 574,21	15				

Fuente: elaboración propia.

Basado en la prueba de Fisher, se concluye:

$$f_{calculada}(2,382) < f_{teórica}(4,600): \text{Ho se acepta.}$$

### Análisis de varianza para L\* de la muestra Y5

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	8	1 830	228,75	62326,785
86,1286667	8	736,296	92,037	3,464

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	74 761,777	1	74 761,777	2,398	0,143	4,600
Dentro de los grupos	436 311,755	14	31 165,125			
Total	511 073,532	15				

Fuente: elaboración propia.

Con base en la prueba de Fisher, se concluye:

$$f_{calculada}(2,398) < f_{teórica}(4,600): \text{Ho se acepta.}$$

### Análisis de varianza para L\* de la muestra Y6

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	8	1 830	228,75	62 326,785
86,403	8	740,144	92,518	3,459

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	74 236,585	1	74 236,585	2,382	0,145	4,600
Dentro de los grupos	436 311,715	14	31 165,122			
Total	510 548,301	15				

Fuente: elaboración propia.

Basado en la prueba de Fisher, se concluye:

$$f_{calculada}(2,380) < f_{teórica}(4,600): \text{Ho se acepta.}$$

### Análisis de varianza para a\* de la muestra Y0

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Tiempo de exposición (h)	9	1 830	203,333	60 350
a*	9	39,977	4,441	17,293

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	178 010,13	1	178 010,13	5,897	0,027	4,493
Dentro de los grupos	482 938,348	16	30 183,646			
Total	660 948,478	17				

Fuente: elaboración propia.

Con base en la prueba de Fisher, se concluye:

$$f_{calculada}(5,897) > f_{teórica}(4,493): \text{Ho se rechaza.}$$

### Análisis de varianza para a\* de la muestra Y1

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	8	1 830	228,75	62 326,785
11,531	8	26,250	3,281	9,936

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	203 344,554	1	203 344,554	6,524	0,022	4,600
Dentro de los grupos	436 357,058	14	31 168,3613			
Total	639 701,612	15				

Fuente: elaboración propia.

Basado en la prueba de Fisher, se concluye:

$$f_{calculada}(6,524) > f_{teórica}(4,600): \text{Ho se rechaza.}$$

### Análisis de varianza para a\* de la muestra Y2

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	8	1 830	228,75	62 326,785
12,619	8	27,307	3,413	8,993

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	203 106,228	1	203 106,228	6,516	0,022	4,600
Dentro de los grupos	436 350,454	14	31 167,889			
Total	639 456,682	15				

Fuente: elaboración propia.

Con base en la prueba de Fisher, se concluye:

$$f_{calculada}(6,516) > f_{teórica}(4,600): \text{Ho se rechaza.}$$

### Análisis de varianza para a\* de la muestra Y3

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	8	1 830	228,75	62 326,785
10,625	8	28,059	3,507	7,162

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	202 936,81	1	202 936,81	6,511	0,023	4,600
Dentro de los grupos	436 337,636	14	31 166,974			
Total	639 274,446	15				

Fuente: elaboración propia.

Basado en la prueba de Fisher, se concluye:

$$f_{calculada}(6,511) > f_{teórica}(4,600): \text{Ho se rechaza.}$$

### Análisis de varianza para a\* de la muestra Y4

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	8	1 830	228,75	62 326,785
12,194	8	23,344	2,918	8,396

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	204 000,294	1	204 000,294	6,545	0,022	4,600
Dentro de los grupos	436 346,272	14	31 167,590			
Total	640 346,566	15				

Fuente: elaboración propia.

Con base en la prueba de Fisher, se concluye:

$$f_{calculada}(6,545) > f_{teórica}(4,600): \text{Ho se rechaza.}$$

### Análisis de varianza para a\* de la muestra Y5

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	8	1 830	228,75	62 326,785
10,931	8	20,461	2,557	6,429

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	204 651,962	1	204 651,962	6,566	0,022	4,600
Dentro de los grupos	436 332,507	14	31 166,607			
Total	640 984,469	15				

Fuente: elaboración propia.

Basado en la prueba de Fisher, se concluye:

$$f_{calculada}(6,566) > f_{teórica}(4,600): \text{Ho se rechaza.}$$

### Análisis de varianza para a\* de la muestra Y6

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	8	1 830	228,750	62 326,785
10,669	8	20,401	2,550	5,062

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	204 665,534	1	204 665,534	6,566	0,022	4,600
Dentro de los grupos	436 322,934	14	31 165,923			
Total	640 988,468	15				

Fuente: elaboración propia.

En base a la prueba de Fisher, se concluye:

$$f_{calculada}(6,566) > f_{teórica}(4,600): H_0 \text{ se rechaza.}$$

### Análisis de varianza para b\* de la muestra Y0

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Tiempo de exposición (h)	9	1 830	203,333	60 350
b*	9	11,738	1,304	2,606

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	183 670,86	1	183 670,86	6,086	0,025	4,493
Dentro de los grupos	482 820,849	16	30 176,303			
Total	666 491,71	17				

Fuente: elaboración propia.

Basado en la prueba de Fisher, se concluye:

$$f_{calculada}(6,086) > f_{teórica}(4,493): H_0 \text{ se rechaza.}$$

### Análisis de varianza para b\* de la muestra Y1

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	8	1 830	228,75	62 326,785
-0,718	8	21,235	2,654	0,731

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	204 476,912	1	204 476,912	6,561	0,022	4,600
Dentro de los grupos	436 292,623	14	31 163,758			
Total	640 769,535	15				

Fuente: elaboración propia.

Con base en la prueba de Fisher, se concluye:

$$f_{calculada}(6,561) > f_{teórica}(4,600): \text{Ho se rechaza.}$$

### Análisis de varianza para b\* de la muestra Y2

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	8	1 830	228,75	62 326,785
-1,494	8	26,980	3,372	0,875

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	203 180,002	1	203 180,002	6,519	0,022	4,600
Dentro de los grupos	436 293,627	14	31 163,830			
Total	639 473,63	15				

Fuente: elaboración propia.

Basado en la prueba de Fisher, se concluye:

$$f_{calculada}(6,519) > f_{teórica}(4,600): \text{Ho se rechaza.}$$

### Análisis de varianza para b\* de la muestra Y3

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	8	1 830	228,75	62 326,785
-1,500	8	27,777	3,472	1,724

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	203 000,484	1	203 000,484	6,513	0,023	4,600
Dentro de los grupos	436 299,571	14	31 164,255			
Total	639 300,055	15				

Fuente: elaboración propia.

Con base en la prueba de Fisher, se concluye:

$$f_{calculada}(6,513) > f_{teórica}(4,600): \text{Ho se rechaza.}$$

### Análisis de varianza para b\* de la muestra Y4

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	8	1 830	228,75	62 326,785
-1,712	8	15,375	1,921	0,881

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	205 803,842	1	205 803,842	6,603	0,022	4,600
Dentro de los grupos	436 293,669	14	31 163,833			
Total	642 097,51	15				

Fuente: elaboración propia.

Basado en la prueba de Fisher, se concluye:

$$f_{calculada}(6,603) > f_{teórica}(4,600): \text{Ho se rechaza.}$$

### Análisis de varianza para b\* de la muestra Y5

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	8	1 830	228,75	62 326,785
-1,287	8	15,854	1,981	0,599

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	205 695,206	1	205 695,206	6,600	0,022	4,600
Dentro de los grupos	436 291,696	14	31 163,692			
Total	641 986,902	15				

Fuente: elaboración propia.

En base a la prueba de Fisher, se concluye:

$$f_{calculada}(6,600) > f_{teórica}(4,600): \text{Ho se rechaza.}$$

### Análisis de varianza para b\* de la muestra Y6

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0	8	1 830	228,75	62 326,785
-1.346	8	19,050	2,381	0,807

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	204 971,093	1	204 971,093	6,577	0,022	4,600
Dentro de los grupos	436 293,156	14	31 163,796			
Total	641 264,249	15				

Fuente: elaboración propia

Con base en la prueba de Fisher, se concluye:

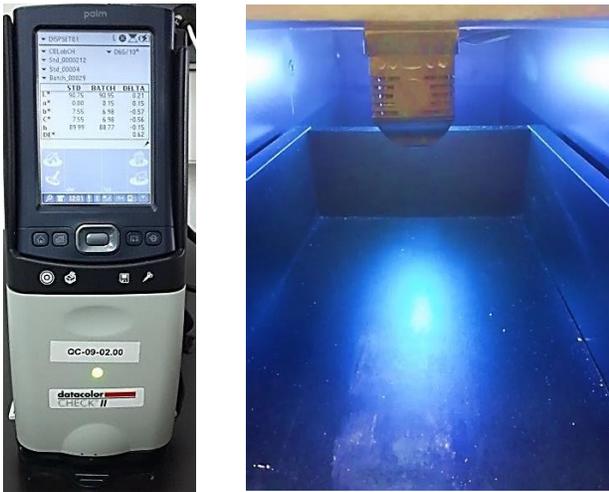
$$f_{calculada}(6,577) > f_{teórica}(4,600): \text{Ho se rechaza.}$$

En conclusión, el parámetro de color  $L^*$  acepta la hipótesis nula: no existe diferencia significativa entre los valores de  $L^*$  para las muestras de mortero de recubrimiento adicionados con nanopartículas de dióxido de titanio  $TiO_2$  y las muestras de mortero de recubrimiento adicionados con  $TiO_2/Si$ , ya que el factor de Fisher es menor al valor teórico para las muestras de mortero en diferentes dosificaciones de adición. Mientras que los parámetros de color  $a^*$  y  $b^*$  rechaza la  $H_0$ . Dado que  $F_c > F_t$ , se rechaza la hipótesis nula. De esto se infiere que las medias de los parámetros de color  $a^*$  y  $b^*$  si difieren significativamente entre sí. El tiempo de exposición a la luz ultravioleta sí afecta significativamente a los parámetros de color.

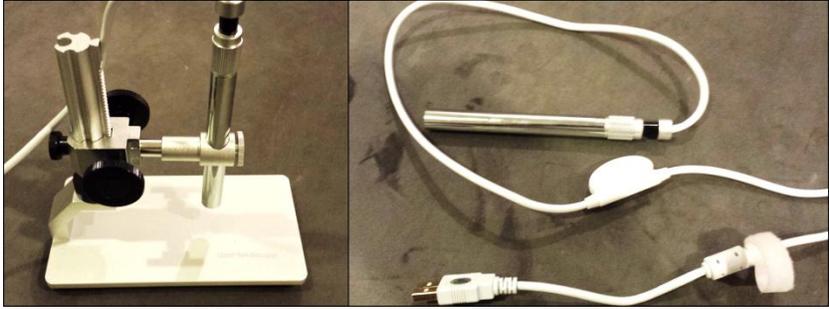
Apéndice 5. **Equipo utilizado en la fase experimental**

<b>Método o ensayo</b>	<b>Equipo</b>
<p data-bbox="337 1184 542 1255"><b>Difracción de Rayos X</b></p>	<p data-bbox="724 600 1287 667">Difractómetro de rayos X Panalytical con equipo de preparación de muestras</p>  

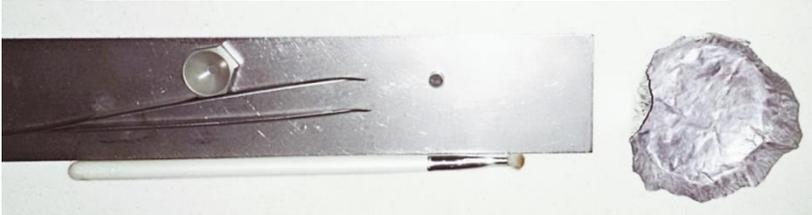
Continuación apéndice 5

<p><b>Autolimpieza</b></p>	<p>Espectrofotómetro portátil Datacolor Check II y cámara con lámpara de luz UV</p>  <p>The image shows a Datacolor Check II spectrophotometer on the left, which is a handheld device with a color display and a physical keypad. The screen displays various color data points. To its right is a rectangular chamber illuminated with a bright blue UV light, used for curing or measuring under specific light conditions.</p>
<p><b>Preparación de probetas</b></p>	 <p>The image illustrates the preparation of test specimens. It features three main components: a Sartorius analytical scale at the top center showing a reading of 0.0501 g; a water bath at the bottom left containing a beaker with a pink liquid; and a mechanical mixer at the bottom right with a pink mixture in its bowl.</p>

Continuación apéndice 5

<p><b>Ángulo de contacto</b></p>	<p>Microscopio digital USB Opti-Tekscope</p>  
<p><b>Permeabilidad</b></p>	<p>Tubo de Karsten</p> 

Continuación apéndice 5

<p><b>TGA</b></p>	<p><b>TGA/DSA Mettler Toledo 1 Star System</b></p>  
<p><b>Absorción por capilaridad</b></p>	<p><b>Balanza</b></p> 

Fuente: elaboración propia.

## ANEXOS

### Anexo 1. Ficha técnica del mortero monocapa ultra liso



# MONOCAPA ULTRA LISO

---

### DESCRIPCIÓN

Es un mortero premezclado en seco compuesto de carbonato de calcio, cal hidratada, cemento blanco, fibras y aditivos químicos. Diseñado especialmente para realizar alisados ultra lisos de espesores de 1 mm, sobre superficies previamente repelladas. Solo requiere que agregue agua. Cumple con la norma COGUANOR NTG 41050 y normas UNE-EN 1015-12

Se recomienda aplicar Monocapa Ultra liso sobre superficies debidamente repelladas con productos monocapas de Mixto Listo, los repellos deben tener un acabado fino en su superficie al ser aplicados.

---

### VENTAJAS

- Listo para usar
- Baja permeabilidad
- Fácil de cuantificar el material a utilizar
- Calidad uniforme y controlada
- Aumenta la productividad de la mano de obra
- Mayor rendimiento
- Fácil y rápida aplicación
- Fácil de mezclar
- Alta adherencia
- Rapidez en tallado de molduras y filos

---

### PRESENTACIÓN

- Empacado en bolsa con 40 kg (88 lb) de contenido.

---

### USOS

Aplicación:

- Sobre repellos con acabado fino de Mixto Listo
- Paneles de tablayeso para interiores y exteriores
- Sobre Monocapas con acabado fino de Mixto Listo
- Elementos prefabricados de concreto
- Paneles de fibrocemento

---

### DATOS TÉCNICOS

Descripción	Características
Resistencia a la compresión	53 kg/cm <sup>2</sup> (750 psi) a los 28 días.
Resistencia a la adherencia	5 kg/cm <sup>2</sup> (72 psi) a los 28 días.
Tamaño máximo del agregado	0.30 mm (Tamiz No. 50).
Dosificación de agua	13.50 – 15.50 L / bolsa (3.57 – 4.10 Gal US / bolsa).
Rendimiento por bolsa	20 -25 m <sup>2</sup> / por bolsa 40 kg.
Espesor recomendado	0.50 - 1.00 mm




PÍDELO AL 1780

VZ 04/16

## Continuación anexo 1

### INSTRUCCIONES DE USO

**Preparativo.** Limpie la superficie donde se aplicará Ultra liso (debe estar libre de polvo, partículas sueltas, grasas o cualquier sustancia que no permita adherencia). Por último humedezca la superficie previamente repellada fina.

**Mezclado.** Mezcle el contenido de la bolsa en forma gradual con la cantidad de agua indicada, hasta obtener una consistencia uniforme. Utilizando una batidora, mezcladora para morteros.

**Colocado.** Aplique una capa de Monocapa Ultra liso de 1mm de espesor contra la superficie de aplicación con plancha metálica. Después de aprox. 30 minutos empareje la superficie con plancha de esponja o plancha de duroport plástico (preferentemente) aplicando más Monocapa Ultra liso donde sea necesario y ejecute el acabado alisado con plancha metálica.

**Curado.** Rocíe agua con un atomizador sobre el mortero 2 a 3 veces al día durante 7 días. Comience el rociado con agua aprox. 6 horas después de terminar el colocado.

### RECOMENDACIONES PARA OBTENER MEJORES RESULTADOS

- Cubra las bolsas al transportarlas y almacénelas en un lugar fresco, seco, bajo techo y sobre tarimas que las aislen del contacto directo con el suelo. No permita que la bolsa se humedezca antes de utilizarla.
- Realice la mezcla en una superficie o recipiente limpio, preferiblemente utilizando una mezcladora de paletas para morteros o una batidora mezcladora para morteros.
- **No agregue más agua de lo indicado** al Ultra liso, hacer esto reduce la resistencia a la compresión y la adherencia. Tampoco agregue más agua si después de un tiempo la mezcla comienza a secar o a endurecer. Deseche la mezcla si ya no es apta.
- Aplique el Monocapa Ultra liso en una sola capa. En superficies de fibrocemento y tablayeso el rendimiento del Monocapa Ultra liso puede ser hasta 30 m<sup>2</sup>.
- En condiciones extremas del clima (sol, viento y/o lluvia extrema), proteja el producto del ambiente después de aplicado.

### MEDIDAS DE SEGURIDAD

- Utilice equipo de protección personal cuando manipule este producto (casco, anteojos, mascarilla, guantes y botas).
- Lávese las manos después de utilizar este producto. Evite el contacto con los ojos, si ocurriese, lávese inmediatamente con agua limpia.
- No deje este producto al alcance de los niños.



+ El uso de este producto está limitado a las características expuestas en esta hoja técnica, cualquier uso distinto al mismo puede variar los resultados esperados.  
++ Los tiempos indicados en esta hoja técnica son aproximados, los mismos varían según las condiciones específicas de cada proyecto.

Fuente: Mixto Listo.