



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERIA CIVIL – CONSTRUCCIÓN

PROPIEDADES FOTOCATALÍTICAS DEL DIÓXIDO DE TITANIO EN CONCRETO Y
MORTERO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
HUMBERTO ÁVILA GARCÍA

TUTOR ES PRINCIPALES:
ING. JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES; FACULTAD DE INGENIERÍA UNAN
DR. DWIGHT ROBERTO ACOSTA NAJARRO; INSTITUTO DE FÍSICA UNAM

Ciudad Universitaria, CDMX. Abril 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: ING. CARLOS ENRIQUE VIRELAS MARTÍNEZ

Secretario: M.I. MARCO TULIO MENDOZA ROSAS

Vocal: ING. JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES

1^{er.} Suplente: DR. DWIGHT ROBERTO ACOSTA NAJARRO

2^{d o.} Suplente: DR. FRANCISCO GONZÁLEZ DÍAZ

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: LABORATORIO DE MATERIALES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM Y EL INSTITUTO DE FÍSICA UNAM.

TUTOR DE TESIS:

ING. JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES

FIRMA

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Dwight Roberto Acosta y al Ing. Juan Luis Cottier, por hacer posible este proyecto de investigación y dejarme utilizar las instalaciones en el Instituto de Física de la UNAM y el laboratorio de estructuras y materiales de la UNAM, a su vez gracias por dedicarme su tiempo y conocimientos para poder realizar un buen trabajo de investigación. También quiero agradecer al Dr. Francisco Hernández y al Dr. Carlos Raúl Magaña, que me apoyaron en todo momento para poder sintetizar las nanopartículas de dióxido de titanio.

Un especial agradecimiento a mi familia y amigos que ha estado siempre apoyándome en todo momento para poder llevar a cabo este proyecto de investigación que tanto tiempo y esfuerzo le he dedicado; sin embargo el agradecimiento más grane es para mis padres Yolanda García y Joaquín Ávila, que sin su apoyo incondicional y sus consejos que me ha brindado a lo largo de los años que tengo de vida no hubiera sido posible estar presente en este punto de mi vida.

Por último y no menos importante agradezco a Carmina Flores, que me ha brindado su apoyo incondicional y me ha aconsejado siempre para poder dar lo máximo de mí en todo momento.

Resumen

La globalización y el aumento de la población en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), ha generado el aumento de emisión de agentes contaminantes a la atmosférica, siendo una de los principales problemas el deterioro a la salud de los habitantes de dichas urbes; a su vez estos contaminantes generan la aparición de manchas superficiales en las fachadas de las edificaciones urbanas, generando un mal aspecto de las mismas o en casos extremos deteriorando las estructuras reduciendo la vida útil de las mismas. Estas problemáticas han generado un área de oportunidad en el ramo de la ingeniería civil con el fin de tratar de mitigar estos fenómenos producidos por la contaminación atmosférica.

En el presente trabajo de investigación, se desarrolló el estudio de las propiedades fotocatalíticas que presentan las nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2) fase anatasa, en probetas de cemento y de mortero, evaluando sus propiedades de autolimpieza y descontaminantes de gases tipo NO_x .

El proceso experimental está dividido en dos partes con el fin de evaluar dos fenómenos diferentes que ocurren al mezclar las nanopartículas de dióxido de titanio en mezclas de concreto y de mortero, las cuales actúan simultáneamente, sin embargo para este estudio se están evaluando por separado con el fin de controlar sus variables. La primera de ellas, es la evaluación de las propiedades de autolimpieza superficial que presentan las probetas de concreto y de mortero adicionadas con nanopartículas de dióxido de titanio, utilizando como contaminante una solución de azul de metileno. En la segunda rama de investigación se evaluará la capacidad que presentan las probetas de cemento y de mortero para degradar contaminación atmosférica, utilizando como gas contaminante dióxido de nitrógeno (NO_2), siendo esta una de las principales emisiones contaminantes generadas en la ZMVM, producida principalmente por la combustión de los vehículos motorizados.

Índice

1	Introducción.....	1
2	Justificación.....	1
3	Objetivo.....	2
4	Contaminación.....	3
4.1	Contaminación atmosférica	3
4.2	Efectos de la contaminación atmosférica	5
4.2.1	Efectos de los contaminantes sobre el hombre y los animales	5
4.2.2	Efecto de los contaminantes sobre la vegetación.....	6
4.2.3	Efectos de los contaminantes sobre superficial en fachadas urbanas	6
4.3	Situación actual de la contaminación atmosférica en la ZMVM.....	7
5	Dióxido de Titanio	10
5.1	Generalidades	10
5.2	Propiedades Químicas.....	11
5.3	Manufactura del dióxido de titanio	11
5.3.1	Métodos Industriales.....	12
5.3.2	Métodos de laboratorio	12
5.4	Propiedades de nanopartículas de dióxido de titanio.....	13
5.5	Principales aplicaciones de nanopartículas de dióxido de titanio	14
6	Fotocatálisis	15
6.1	Generalidades	15
6.2	Semiconductor.....	15
6.3	Radiación solar ultravioleta y su comportamiento en la ZMVM.....	16
6.4	Proceso Fotocatalítico.....	18
6.5	Fotocatálisis Heterogénea en superficies cementantes con adiciones de TiO₂.....	19
7	Desarrollo experimental	21
7.1	Síntesis de nanopartículas de dióxido de titanio	21
7.2	Diseño de probetas.....	23
7.2.1	Consideraciones	24
7.2.2	Propiedades de los agregados utilizados.....	24
7.2.3	Diseño de mezcla.....	26
7.2.4	Elaboración de las probetas	27
7.3	Pruebas de autolimpieza superficial de azul de metileno.....	29
7.3.1	Procedimiento experimental de autolimpieza de azul de metileno.....	29
7.3.2	Resultados de autolimpieza superficial de azul de metileno.....	31
7.3.3	Resultados obtenidos e interpretación de resultados de autolimpieza de azul de metileno	57

7.4	Pruebas de degradación de dióxido de nitrógeno NO₂	60
7.4.1	Procedimiento experimental de autolimpieza de dióxido de nitrógeno NO ₂	60
7.4.2	Resultados de autolimpieza superficial de dióxido de nitrógeno	62
7.4.3	Resultados obtenidos e interpretación de resultados de autolimpieza de dióxido de nitrógeno NO ₂	87
8	Análisis económico de mezclas normales vs mezclas adicionados con dióxido de titanio	91
8.1	Análisis de costo	91
8.2	Análisis beneficios-costos	93
9	Conclusiones y comentarios	96
10	Bibliografía.....	97

1 Introducción

La globalización y el incremento acelerado de la población en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), ha generado el aumento de emisión de agentes contaminantes a la atmósfera, siendo uno de los principales problemas el deterioro a la salud de los habitantes de estas urbes; a su vez estos contaminantes provocan la aparición de manchas superficiales en las fachadas de las edificaciones urbanas, generando un mal aspecto de las mismas o en casos extremos deteriorando las estructuras reduciendo su vida útil.

El aumento de la emisión de gases contaminantes en la ZMVM ha generado que los gobiernos de estas entidades tomen medidas preventivas para disminuir dichas emisiones a la atmósfera con el fin de mitigar la contaminación en la ZMVM. Entre las medidas que se ha llevado a cabo es la aplicación del **DOBLE HOY NO CIRCULA** y un ajuste más estricto al **PROGRAMA DE VERIFICACIÓN VEHICULAR**. Cabe señalar que estas medidas precautorias no son suficientes para mitigar la contaminación en la ZMVM, ya que dichas medidas están a expensas de otros factores externos que obstruyen su correcta implementación, entre las cuales lamentablemente se encuentran la corrupción, la falta de transporte público y la delincuencia, impidiendo que la población de dicha urbe busque otras formas de movilidad como es el uso del transporte público.

Una vez conociendo el contexto que rodea la situación actual de la ZMVM, es de interés encontrar nuevas formas más eficientes y rápidas de mitigar la contaminación atmosférica que se presenta en la ZMVM, las cuales no solo sirven para el uso exclusivo de estas entidades federativas, sino también para su implementación en las grandes urbes de México, las cuales están presentando un crecimiento acelerado y con ello el aumento de emisiones contaminantes a la atmósfera.

2 Justificación

El creciente aumento de la contaminación atmosférica que se presenta en la ZMVM, ha desatado grandes problemas a la salud de sus habitantes; así como daños superficiales a las edificaciones de las áreas urbanas, la cual produce su deterioro, disminuyendo la vida útil de las mismas, por lo que es indispensable implementar nuevas líneas de acción que mitiguen estos daños. Siendo una de estas líneas de acción el desarrollo de nuevos materiales de construcción, los cuales tengan propiedades descontaminantes, que puedan reducir la contaminación atmosférica y a su vez la contaminación superficial de las edificaciones de la mancha urbana.

Los nuevos materiales de construcción descontaminantes tienen como base la adición de nanopartículas que presenten propiedades fotocatalíticas, siendo una de las económicas y fácil de obtener; las nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2), que al combinarse con materiales de construcción le otorgan propiedades descontaminantes y de auto limpieza.

Conociendo la importancia de encontrar formas más eficaces de solucionar los problemas de contaminación que presenta la ZMVM; el enfoque del presente trabajo se orienta en la investigación de la acción que tiene la adición de nanopartículas de dióxido de titanio en mezclas a base de cemento Portland tanto en morteros y concretos, con el fin de asemejar los recubrimientos definitivos en las fachadas de las edificaciones urbanas en el caso del mortero y los terminados aparentes en las diferentes construcción a base de concreto, con el fin de demostrar que mediante el uso de materiales fotocatalíticos se pueden mitigar la contaminación atmosférica y mantener libres de contaminantes superficiales las fachadas de las edificaciones urbanas.

3 Objetivo

El objetivo de este proyecto de investigación es la evaluación fotocatalítica que presenta las mezclas a base de cemento Portland, al agregarles nanopartículas de dióxido de titanio, con el fin de obtener materiales con propiedades de autolimpieza, que al momento de interactuar con radiación ultravioleta, puedan eliminar partículas contaminantes que se encuentran en la atmósfera y en la superficie de las construcciones a base de concreto y mortero.

4 Contaminación

En las últimas décadas ha tomado gran importancia el cuidado del medio ambiente, debido al deterioro de las condiciones del mismo, generado por el aumento exponencial de la población humana y su demanda creciente de materias primas, en su afán de facilitarse la vida, generando un incremento en la acumulación de desperdicios y residuos sólidos, líquidos y de todo tipo que contaminan la biosfera, alcanzando volúmenes que el medio ambiente no puede asimilar, agotando las fuerzas regenerativas que presenta la naturaleza para eliminar dichos volúmenes.

Existen muchas definiciones de contaminación ambiental, sin embargo la definición con más aceptación es la siguiente: introducción de un exceso de materiales extraños al medio ambiente (agentes físicos, químicos y biológicos), bajo condiciones tales, que esas sustancias interfieren con la salud y comodidad del entorno, alterando el equilibrio ecológico de la zona.⁽¹⁾

4.1 Contaminación atmosférica

El aire es una mezcla de gases que rodea la Tierra en una capa relativamente delgada. La mayor parte del aire (95%) se encuentra dentro de los primeros 20 Km sobre el nivel del mar, por encima de los cuales disminuye en densidad hasta desvanecerse de manera gradual en el vacío del espacio. La parte más baja de dicha capa, la troposfera, tiene aproximadamente 8 Km de espesor en los polos de la Tierra, y cerca del doble en el ecuador. En su mayor parte, las actividades del hombre se realizan sobre la superficie de la Tierra dentro de los primeros 2 Km de la atmósfera; los contaminantes generados por estas actividades se filtran directamente en la tropósfera donde son mezclados y transportados.

Los componentes principales del aire, nitrógeno (78%), oxígeno (20.94%), argón (0.93%) y dióxido de carbono (0.032%), los cuales no reaccionan entre si bajo circunstancias normales. Asimismo las pequeñas cantidades de helio, neón, criptón, xenón, hidrógeno y óxido nitroso tienen poca o ninguna interacción con otras moléculas. Algunos otros gases, también presentes en pequeñas cantidades, no son químicamente inertes, sino que interactúan con la biosfera y entre ellos mismos; en consecuencia, esos gases tienen un tiempo de permanencia limitado en la atmósfera y concentraciones característicamente variables.

Gases Principales	Símbolo Químico	Concentración	Tiempo de residencia calculado
		Porcentaje	
Nitrógeno	N ₂	73	Continuo
Oxígeno	O ₂	20.9	Continuo
Argón	Ar	0.93	Continuo
Dióxido de Carbono	CO ₂	0.032	20 años
Gases raros			
Gases permanentes (no reactivos)		PPM	
Helio	He	5.2	Continuo
Neón	Ne	18	Continuo
Criptón	Kr	1.1	Continuo
Xenón	Xe	0.086	Continuo
Hidrógeno	H ₂	0.5	Desconocido
Óxido nitroso	N ₂ O	0.25	8-10 años
Gases reactivos			
Monóxido de carbono	CO	0.1	0.2-0.3 años
Metano	CH ₄	1.4	<2 años
Hidrocarburos excepto el metano	HC	0.02	Desconocido
Óxido nítrico	NO	0.2 a 2 x 10 ⁻³	2-8 días
Dióxido de nitrógeno	NO ₂	0.5 a 4 x 10 ⁻³	2-8 días
Amoniaco	NH ₃	6 a 20 x 10 ⁻³	1-4 días
Dióxido de azufre	SO ₂	0.03 a 1.2 x 10 ⁻³	1-6 días
Ozono	O ₃	0 a 0.05	Desconocido

TABLA 4.1 COMPOSICIÓN DE AIRE SECO EN LA PARTE MÁS BAJA DE LA TROPOSFERA (LIBRE DE VAPOR DE AGUA).

Los gases reactivos de este grupo son lo que se consideran contaminantes cuando los produce el hombre en cantidades suficientemente elevadas como para exceder en forma significativa a las concentraciones del ambiente señaladas en la tabla 4.1, los gases más importantes dentro de este grupo son los que se encuentran presentes de manera general en el aire de las ciudades del mundo, como son; dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO y NO₂), monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos, excepto el metano. Otros gases reactivos también pueden causar problemas de contaminación en concentraciones elevadas, por ejemplo, los gases halógenos, cloro y flúor, así como sus ácidos derivados: ácido clorhídrico y ácido fluorhídrico; pero estos problemas tienden a ser regionales más que universales.⁽²⁾

4.2 Efectos de la contaminación atmosférica

Los principales contaminantes relacionados con la calidad del aire son el bióxido de azufre (SO_2), el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x), las partículas suspendidas, compuestos orgánicos volátiles (COV) y el ozono (O_3). Los cuales tienen diversos efectos nocivos sobre nuestra salud y pueden afectar en mayor medida a las personas más vulnerables, es decir, a niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias.⁽³⁾

Sin embargo los efectos nocivos ocasionados por la contaminación del aire, no solo afectan al ser humano, también afectan plantas, animales y construcciones, ya que el aire es elemento presente en todo el planeta, teniendo interacción tanto con el entorno ecológico como con el inanimado.

4.2.1 Efectos de los contaminantes sobre el hombre y los animales

El Hombre, al vivir en comunidades desarrolladas y en consecuencia contaminadas, por lo general expone sólo áreas limitadas de piel a la atmósfera; pero cada día inhala aproximadamente 7,500 litros de aire, de tal manera que sus pulmones y sistema respiratorio general está en contacto con ella y tiene la potencialidad de retener cualquier sustancia nociva que pueda estar contenida en ese aire.⁽⁴⁾

En términos generales, los efectos a la salud que se han reportado van desde disturbios fisiológicos menores hasta la muerte. La contaminación del aire afecta los sistemas cardiovascular y respiratorio. Generando en todo el mundo, cerca de 3% de las muertes por enfermedades cardiovasculares atribuidas a la exposición a material particulado. En la figura 4.1 se detalla las afectaciones que originan los diferentes contaminantes del aire en el ser humano.⁽⁵⁾

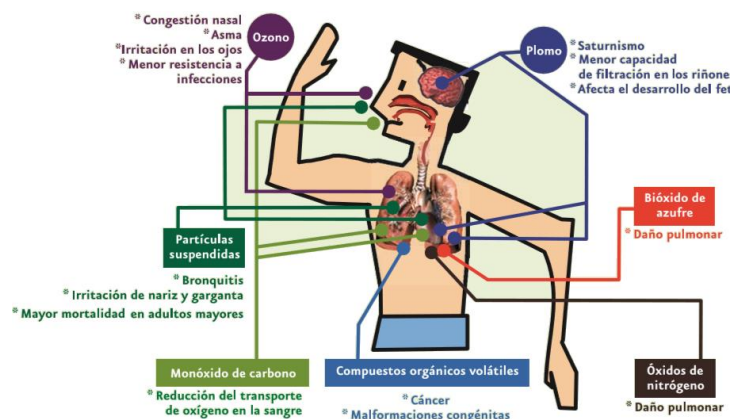


Fig. 4.1 Efectos de los contaminantes del aire en la salud humana.⁽⁶⁾

El aumento de la contaminación del aire y los efectos nocivos que produce al ser humano, ha ocasionado que este tema se convierta en una de las principales preocupaciones de la salud pública en muchas ciudades de América Latina y el Caribe, donde las concentraciones de partículas y de otros contaminantes exceden las normas nacionales de calidad del aire, ya que la exposición a los tipos y

concentraciones de contaminantes que frecuentemente se encuentran en las zonas urbanas se ha relacionado con un aumento de riesgo de mortalidad y morbilidad.⁽⁷⁾

Cabe señalar que la contaminación del aire genera los mismos efectos nocivos en los animales, tanto domésticos como silvestres. Sin embargo uno de los daños más notables y estudiado por la comunidad científica que presenta este grupo, es el edema pulmonar.⁽⁸⁾

4.2.2 Efecto de los contaminantes sobre la vegetación

Como se ha mencionado anteriormente, la contaminación del aire no solo afecta al ser humano, también tiene efectos en la vegetación, ya que puede afectar las plantas en diferentes grados, entre los principales elementos contaminantes del aire que afectan la vegetación se encuentra el dióxido de azufre (SO₂), óxido de nitrógeno (NO₂), hidrocarburos (HC) y ozono (O₃); estos agentes contaminantes generan grandes afectaciones a la vegetación; en los niveles más bajos se encuentran daños visibles, efectos crónicos acumulativos, efectos genéticos, cambios graduales en la composición vegetal. Sin embargo aún a este nivel los contaminantes se pueden almacenar en la plantas, introduciéndose en la cadena alimenticia y afectando a los animales que se comen dichas plantas.

Las plantas adquieren los contaminantes de diferentes maneras, ya sea directamente, a través de intercambio de gases con la atmósfera, o través de la humedad absorbida del suelo.⁽⁹⁾

4.2.3 Efectos de los contaminantes sobre superficial en fachadas urbanas

Los efectos de la contaminación atmosférica sobre los materiales, con los que están contruidos los monumentos históricos, edificios y vialidades, tienen importantes repercusiones a nivel social, ya que producen daños irreparables que provocan pérdidas de parte de nuestra historia. También lleva consigo un costo económico importante al generar una disminución del valor patrimonial del edificio y ocasionar gastos elevados de mantenimiento en sus fachadas (limpieza, tratamientos de protección, etc.), que es necesario realizar para recuperar dicho bien. La contaminación atmosférica es un agente de deterioro que origina que algunos monumentos o edificios se ven deteriorados.⁽¹⁰⁾

La suciedad de una fachada puede definirse como el depósito y la acumulación de partículas y sustancias contenidas en el aire atmosférico tanto en la superficie exterior de la fachada como en el interior de los poros de la misma. Este último caso es el más dañino para el material de fachada, ya que significa la parte final del proceso patológico del ensuciamiento; el fenómeno de ensuciamiento de las fachadas está estrechamente relacionado con otras lesiones de origen químico, por ejemplo, las partículas ensuciantes que se adhieren a una fachada pueden llegar a reaccionar químicamente con ciertos componentes de los materiales del mismo y provocar peligrosas patologías.

La acumulación de suciedad sobre las fachadas es un hecho general e inevitable, puesto que cualquier edificio está rodeado de aire atmosférico y, por tanto, es susceptible de recibir partículas orgánicas e inorgánicas que se hallan suspendidas en ese aire. Sin embargo, no es difícil comprender que en las

grandes ciudades, donde la contaminación atmosférica es mucho mayor, el fenómeno del ensuciamiento se manifiesta con más intensidad.⁽¹¹⁾



Fig. 4.2 Suciedad presente en fachadas de distribuidores viales y edificaciones ubicadas en la ZMVM.

Entre los principales contaminantes atmosféricos que pueden afectar la durabilidad de nuestras edificaciones se encuentran el dióxido de azufre, óxidos de carbono, dióxido y monóxido de nitrógeno, ozono, partículas en suspensión, entre otros. Todos estos elementos pueden reaccionar entre sí, favorecida las reacciones por la presencia de humedad en el ambiente, por la radiación solar o presencia de otros elementos como el ozono u otros catalizadores como el Fe, V, Mn, etc., que facilitan y aceleran las reacciones para formar nuevos contaminantes, denominados secundarios. Estos contaminantes son mucho más dañinos para los materiales, ya que al reaccionar con el agua aumentan su acidez y dan lugar a la lluvia ácida, facilitando los procesos de degradación de los materiales pétreos por mecanismos de disolución y de hidrólisis, formando las denominadas costras negras en las fachadas de los edificios y monumentos históricos.⁽¹⁰⁾

4.3 Situación actual de la contaminación atmosférica en la ZMVM

A pesar de que la calidad del aire que se respira hoy en la ZMVM es mejor que la que se respiraba hace dos décadas, en los últimos años la tasa de decremento de las concentraciones ha disminuido, siendo el ozono (O_3) y las partículas suspendidas menores a 10 micrómetros (PM_{10}), los contaminantes atmosféricos que más preocupan por encontrarse durante varios días al año por encima de las normas de salud.

En las figuras 4.3 y 4.4 se muestran la tendencia en la concentración de estos contaminantes en la atmósfera de la ZMVM, monitoreadas de 1990 a marzo de 2016, las cuales fueron medidas por el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México (SIMAT). En ambos casos es claro que la reducción en la concentración de los contaminantes se ha estancado o incluso ha comenzado a aumentar.⁽¹²⁾

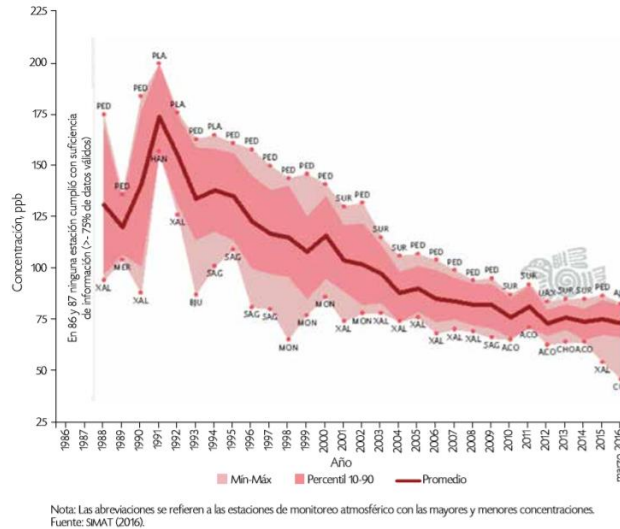


Fig. 4.3 Tendencia en la concentración promedio anual de O3.⁽¹²⁾

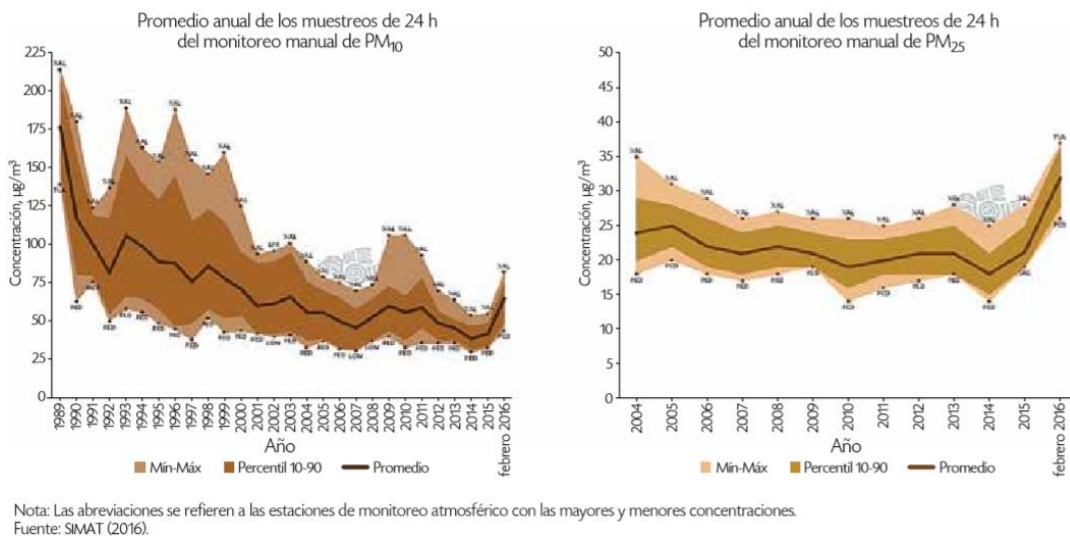


Fig. 4.4 Tendencia en la concentración promedio anual de partículas.⁽¹²⁾

En la ZMVM, el ozono continúa como el principal contaminante responsable del deterioro de la calidad del aire, resultado de la reacción química entre óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles (COV) los cuales interactúan en presencia de luz solar; donde la fuente principal de emisión de (NO_x) es la combustión de gasolina.⁽¹²⁾

El transporte, la industria y los servicios de la ZMVM emiten diariamente a la atmósfera alrededor de 175 mil toneladas de contaminantes gaseosos o en forma de partículas, generados principalmente por

la quema de combustibles fósiles, siendo el transporte uno de los principales precursores de ozono en la ZMVM, como se muestra en la figura 4.5. ⁽¹³⁾

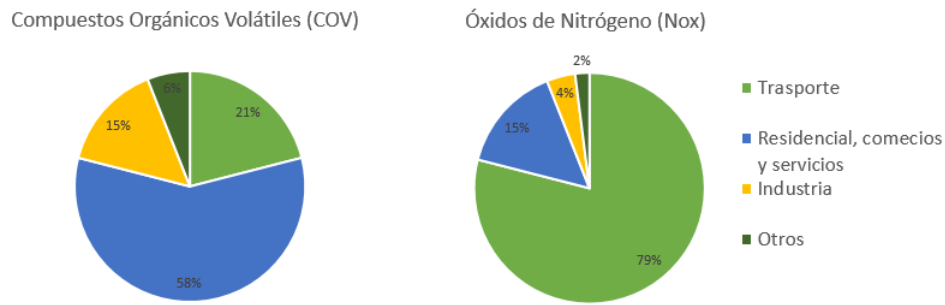


Fig. 4.5 Principales precursores de ozono en la ZMVM.⁽¹⁴⁾

Según los resultados del inventario de emisiones, los vehículos a gasolina siguen teniendo una contribución muy importante en la emisión primaria de los precursores de ozono, los cuales representan 79% de las emisiones de NO_x y 21% de las emisiones de COV ⁽¹⁴⁾, por lo que es indispensable reducir la emisión de este tipo de contaminantes con el fin de mitigar la generación de ozono en la ZMVM, generando un área de oportunidad a la implementación y puesta a prueba de nuevos avances tecnológicos, siendo el caso del presente trabajo de investigación, en el cual se pretende demostrar la reducción de contaminación atmosférica y eliminación de manchas superficiales en la edificaciones urbanas, mediante el uso de materiales fotocatalíticos en el ramo de la construcción.



Fig. 4.6 Fotografías comparativas de un día sin contaminación atmosférica ⁽¹⁵⁾ y otro con contaminación atmosférica en ZMVM.

5 Dióxido de Titanio

5.1 Generalidades

El titanio es muy abundante en la Tierra, siendo el cuarto metal estructural más abundante en la superficie terrestre y el noveno en la gama de metales industriales. Sin embargo, este metal no se encuentra en estado puro, sino en forma de óxido en minerales como el rutilo, la ilmenita y la esfena.⁽¹⁶⁾

El dióxido de titanio, fue descubierto en 1821, sin embargo no fue hasta 1916 que gracias a los avances tecnológicos que pudo ser producido en masa. En primer lugar hizo comercialmente en Noruega para fines industriales.⁽¹⁷⁾

El óxido de titanio (IV) o dióxido de titano (TiO_2) se puede encontrar en distintas formas cristalográficas en la naturaleza, rutilo (estructura tetragonal), anatasa (estructura octaédrica) y brookita (estructura ortorrómbica). Solamente las formas anatasa y rutilo tienen buenas propiedades pigmentarias. Sin embargo, rutilo es térmicamente más estable que la anatasa.⁽¹⁸⁾

A continuación se describen brevemente de las diferentes formas cristalográficas en las que se presenta el dióxido de titanio en la naturaleza:

➤ Rutilo

El rutilo (estructura cristalina tetragonal) es la forma más frecuente en la que el óxido de titanio (TiO_2) aparece en la naturaleza, el menor volumen molecular del rutilo hace que sea un mineral propio de rocas plutónicas y rocas metamórficas generadas a elevada presión y temperatura.⁽¹⁹⁾

➤ Anatasa

La anatasa (estructura cristalina tetragonal) es un mineral secundario, proveniente de otros minerales portadores de titanio. Se puede encontrar en rocas ígneas y metamórficas, así como en pegmatitas. Cuando se calienta por encima de 915°C , la anatasa se transforma en rutilo, otra forma mineral de TiO_2 .⁽²⁰⁾

➤ Brookita

La composición química de la brookita (estructura cristalina ortorrómbica) es exactamente la misma que la del rutilo y la de la anatasa. En el caso de la brookita el factor fundamental de diferenciación es la temperatura a la que cristaliza, si se calienta un cristal de brookita hasta temperaturas cercanas a los 750°C , ésta se transforma directamente en rutilo. La brookita pertenece al grupo de los minerales denominados hidrotermales, esto es, que se forman por procesos de disolución y precipitación relacionados con la solidificación del magma en las fisuras de rocas preexistentes.⁽²¹⁾

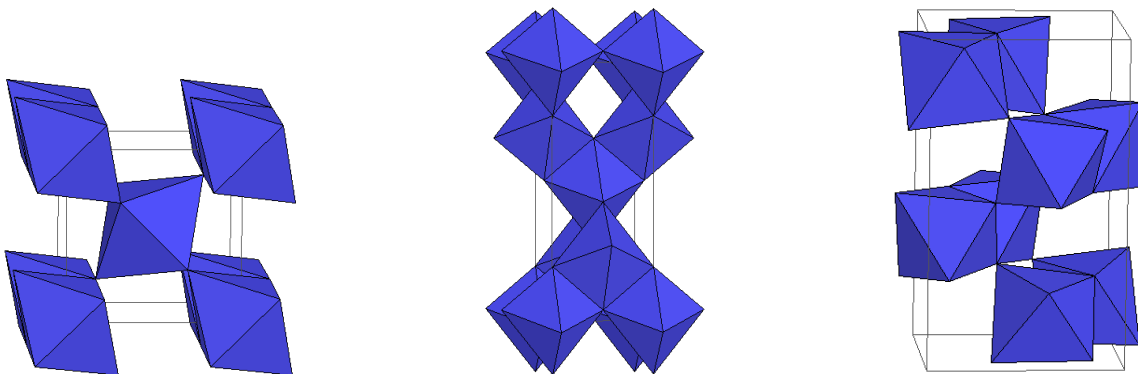


Fig. 5.1 Estructura cristalina del rutilo, de la anatasa y de la brookita respectivamente.⁽²²⁾

5.2 Propiedades Químicas

El dióxido de titanio (TiO_2) es una sustancia inorgánica sólido de color blanco que es térmicamente estable, no inflamable, poco soluble, y no clasificados como peligrosos de acuerdo a las Naciones Unidas (UN) y al Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (GHS).⁽²³⁾

Su nombre químico es dióxido de titanio y su fórmula química es TiO_2 , en la tabla 5.1 se muestran las propiedades químicas del dióxido de titanio.

Peso molecular (g/mol)	80
Densidad (g/cm^3)	4.23
Peso específico (g/cm^3)	3.09 a 4.02
Punto de fusión ($^{\circ}\text{C}$)	1830 a 1850
Punto de ebullición ($^{\circ}\text{C}$)	2500 a 3000
Solubles en agua	$7.4 \times 10^{-5} \text{M}$
Color	Sólido Blanco

TABLA 5.1: CONSTANTES FÍSICAS TÍPICAS DEL TiO_2 .⁽²⁴⁾

5.3 Manufactura del dióxido de titanio

La industria del dióxido de titanio se ha desarrollado de una manera dinámica durante las últimas décadas, se trata de una industria a escala mundial, siendo la producción de unos 1,5 millones de toneladas al año.

Para la obtención del dióxido de titanio se han implementado industrialmente dos métodos, en el cual el producto final que es el TiO_2 no necesariamente nanométrico. Éstos son el proceso sulfato y el proceso cloro. Se estima que industrialmente el 47% de los polvos de TiO_2 son fabricados siguiendo el proceso sulfato y 53% el proceso cloro.⁽²⁵⁾

5.3.1 Métodos Industriales

➤ Método Sulfato

Fue el primer proceso comercial para la manufactura del TiO_2 . El material que se usó de punto de partida fue tradicionalmente la ilmenita, sin embargo recientemente se han utilizado otros minerales con mayores concentraciones de TiO_2 .

El mineral es inicialmente secado, separado y clasificado de modo que se asegure la sulfatación en un baño con ácido sulfúrico concentrado o en una reacción continua de digestión exotérmica. Se debe tratar de maximizar la conversión del TiO_2 a sulfato de titanilo soluble en agua usando una cantidad mínima de ácido. Luego de precipitar el $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y filtrar con el objetivo de retirar las últimas impurezas, el sulfato de titanilo es evaporado e hidrolizado para producir los clusters de óxido de titanio, el cual mediante un proceso de precipitación adecuado toma un tamaño de partícula deseado. Estas partículas después de una adecuada calcinación toman la forma cristalina requerida.⁽²⁵⁾

➤ Método Cloruro

El método más utilizado para la producción de partículas submicrométricas de TiO_2 es conocido también como oxidación en llama. En este caso se parte de un mineral o un desarrollo sintético con una alta concentración de TiO_2 . Se procede a mezclar con carbón y reaccionar en una fuente fluidizada con cloro a aproximadamente $900\text{ }^\circ\text{C}$ hasta obtener TiCl_4 . Se procede entonces a un proceso de enfriamiento para retirar algunas impurezas. El resto del vapor es condensado hasta líquido seguido por una destilación fraccionada para producir TiCl_4 puro.

Mucho del éxito de este método está referido a las características de este intermediario, el cual puede ser purificado, analizado, almacenado y reprocesado tanto como sea necesario. Posteriormente se pasa a una segunda etapa, en la cual se realiza la combustión en una llama oxigenada de TiCl_4 .

Las gotas del óxido líquido nuclea rápidamente en el vapor y luego coalescen. La morfología depende del tiempo de residencia en la llama; tiempos largos conducen a partículas de mayor diámetro, presumiblemente formadas por agregación de las partículas. El tamaño de partícula oscila entre los 10 y 100 nm. Independientemente del tiempo de residencia, los productos formados por oxidación en llama son generalmente fases meta-estables; en el caso del TiO_2 , el producto mayoritario es anatasa.⁽²⁵⁾

5.3.2 Métodos de laboratorio

Estos métodos se emplean esencialmente para preparar materiales con características definidas a partir de soluciones acuosas o alcohólicas que contienen precursores de TiO_2 . Los precursores usuales son tetracloruro o alcóxidos de titanio.⁽²⁵⁾

Existen diversos métodos para la obtención de nanopartículas, sin embargo en el presente trabajo se explicará únicamente el método que llevará a cabo para la obtención de nanopartículas de TiO_2 , el cual se explica de una manera breve a continuación.

➤ **Método Sol-Gel**

Es un procedimiento en solución, que tiene todas las ventajas sobre otras técnicas de preparación en términos de pureza, homogeneidad, control de tamaño de partícula y la flexibilidad en la introducción de dopantes en grandes concentraciones.⁽²⁶⁾

El método sol-gel implica la transición de un sistema en estado líquido, “sol”, a una fase sólida denominada “gel”, las reacciones más importantes que ocurren en el seno del sistema, durante la formación del sol y su transición a gel, son las de hidrólisis y condensación. En el sistema se forman cadenas de partículas sólidas pequeñas inmersas en el líquido (solvente orgánico o acuoso). Las partículas sólidas, o las cadenas de partículas, son tan pequeñas, 1 a 1.000 nm, que las fuerzas gravitacionales son despreciables y las interacciones que predominan son las de tipo Van der Waals, coulombicas y estéricas; el “sol” es estabilizado por la repulsión estérica por el efecto de la doble capa o la combinación de las anteriores.

Cuando el “sol” se coloca en un recipiente, preferiblemente de vidrio, se forma un “gel húmedo”, que con un secado y un tratamiento térmico posterior se puede convertir en un polvo cerámico.⁽²⁷⁾

5.4 Propiedades de nanopartículas de dióxido de titanio

El dióxido de titanio es uno de los materiales industriales o de ingeniería más populares en nuestra vida cotidiana, por ejemplo, el dióxido de titanio ha sido utilizado ampliamente como un pigmento blanco para pinturas, cosméticos y productos alimenticios, pero en los últimos años se han llevado a cabo una serie de investigaciones de sus propiedades en lo que corresponde al uso de nanopartículas de TiO_2 .⁽²⁸⁾

Desde la década de los 50's, se han venido desarrollando diversos estudios con la implementación de nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2), debido a sus múltiples cualidades que tiene, encontrando como una de sus principales características lo que corresponde a la fotocatalisis homogénea y heterogénea, las cuales generan propiedades de auto limpieza, más recientemente se han encontrado otras propiedades que poseen estas nanopartículas, el cual es el efecto hidrofóbico, que permite la impermeabilidad de los materiales.

Uno de los aspectos más interesantes de TiO_2 es que las propiedades fotoquímicas responsables de la fotocatalisis y de su comportamiento hidrofóbico son completamente diferentes, aunque ambos pueden ocurrir simultáneamente en la misma superficie.

5.5 Principales aplicaciones de nanopartículas de dióxido de titanio

Materiales que incluyen nanopartículas de TiO_2 , con dimensiones de menos de 100 nm, han surgido recientemente. Entre los que se encuentran nanopartículas en forma de esferoides, nanotubos, nanocables, nanobastones, nanoláminas y nanofibras. Las propiedades físico-químicas únicas para todas estas formas de nanopartículas de TiO_2 , hacen que este material tenga un futuro prometedor en muchas aplicaciones.

El TiO_2 se utiliza a menudo en una amplia gama de aplicaciones que incluyen propósitos antibacterianos, revestimientos autolimpiables, tratamiento del cáncer, entre otros.⁽²⁹⁾

Las nanopartículas del TiO_2 son aplicables, en los diferentes ramos de la industria; una de las industrias más beneficiadas con la bondad de este nuevo producto, es la industria de la construcción, debido a que se puede combinar con cualquier elemento utilizado en este ramo desde pavimentos, cementos, ventanas, entre otros.

La utilización de materiales o elementos de la industria de la construcción se ha llevado a cabo en mayor medida en el continente europeo y asiático; una de las primeras empresas que empezó a probar este tipo de materiales fue Italcementi, siendo la que tiene la mayoría de las patentes de estos productos; una de sus primeras aplicaciones fue la construcción de la iglesia Dives in Misericordia ubicada en Roma, donde ocuparon por primera vez un cemento fotocatalítico. Una vez observada la eficiencia de los cementos fotocatalíticos, se continuó con la implementación de estos productos.



Fig. 5.2 Iglesia Dives in Misericordia (Roma), Ciudad de la Música y de las Bellas Artes de Chambéry (Francia) y Sede de Ciments du Maroc, Casablanca (Marruecos) respectivamente.⁽³⁰⁾

Actualmente se siguen construyendo edificaciones con materiales a base de cemento que contienen TiO_2 , entre los que se encuentran; la iglesia Dives in Misericordia (Roma, Italia), el edificio público Cité de la Musique et des Beaux-Arts (Chambéry, Francia), la sede de Air France (Paris, Francia), las cuales son una de las edificaciones fotocatalíticas más importante, sin embargo, también existen ya otras edificaciones terminadas en Bélgica, Francia, Italia, Mónaco, Marruecos, Japón y China.⁽³⁰⁾

6 Fotocatálisis

6.1 Generalidades

La fotocatalisis se puede definir como una reacción de oxidación que se produce cuando la radiación solar activa un catalizador (principio fotocatalítico, usualmente dióxido de titanio o derivado) en presencia de oxígeno. Este proceso propicia la descomposición y eliminación de los contaminantes y evita la acumulación de especies o partículas indeseables en el material. Un factor fundamental es la adsorción de moléculas contaminantes sobre la superficie del catalizador donde tiene lugar la reacción.

La actividad fotocatalítica del dióxido de titanio ha sido extensivamente estudiada en aplicaciones de esterilización, desinfección y descontaminación. Estudios previos indican que los materiales de construcción que contienen dióxido de titanio, cuando son expuestos a la radiación solar, pueden oxidar eficientemente los contaminantes adsorbidos sobre su superficie (óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, COVs, formaldehído, emisiones industriales, etc.).⁽³¹⁾

6.2 Semiconductor

Para que pueda ocurrir un proceso fotocatalítico de oxidación-reducción (redox), es necesario que el fotocatalizador sea un material semiconductor como es el caso del dióxido de titanio, por lo que es indispensable conocer que es un material semiconductor y como interactúa en el proceso redox.

Un material semiconductor son aquellos que por sus configuraciones electrónicas podrían clasificarse como un aislante puesto que su banda de valencia (BV) se encuentra llena y su banda de conducción (BC) completamente vacía a 0 °C, sin embargo poseen intervalos de energía prohibidas que se denomina banda prohibida (BP) o brecha de energía (Gap), que es la diferencia entre el nivel de energía entre la banda de conducción y la banda de valencia.⁽³²⁾ La estructura electrónica de un semiconductor se caracteriza por tener las tres bandas de energía que se muestran esquemáticamente en la Figura 6.1, donde BV representa la banda de valencia, BC es la banda de conducción y BP es la banda prohibida (o Gap por su nombre en inglés).

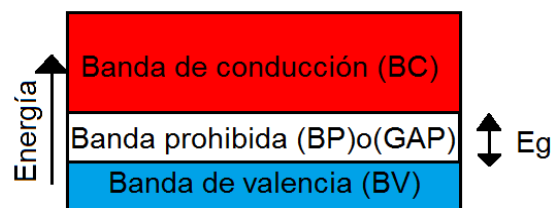


Fig. 6.1 Esquema de bandas de energía para un semiconductor.

Del valor del ancho de banda prohibida (BP) dependen las características electrónicas del material, si es mayor a 4 eV es denominado dieléctrico y si es cercana o igual a cero se le denomina metal, en

cualquier otra circunstancia se denomina semiconductor. La figura 6.2 muestra esquemáticamente el potencial redox correspondiente a la banda de valencia y a la banda de conducción para distintos semiconductores, expresados en eV (escala izquierda de la figura 6.2) o en voltios respecto al potencial del electrodo normal de hidrógeno, ENH (escala derecha de la figura 6.2). Se muestran los potenciales redox de las cuplas $(H^+/\frac{1}{2}H_2)$ y O_2/H_2O respecto del potencial del electrodo normal de hidrogeno (ENH). Nótese que dichas líneas se corren por cambios en el pH, en la presión parcial de oxígeno, o en la temperatura. Aquellos materiales cuya banda de conducción se ubica por encima de la línea H^+/H_2 son termodinámicamente capaces de reducir al agua, mientras que los materiales cuya banda de valencia se ubica por debajo de la línea O_2/H_2O pueden oxidarla.⁽³³⁾

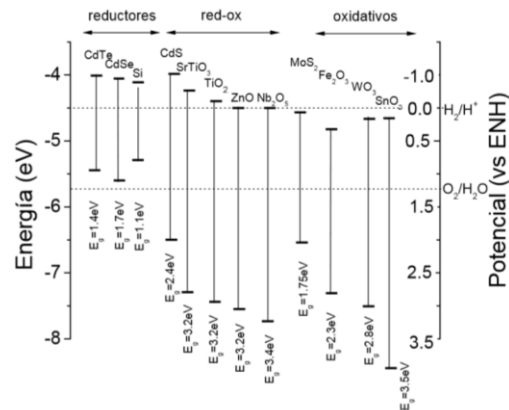


Fig. 6.2 Posición relativa de los bordes de las bandas de conducción y de valencia de algunos semiconductores. ⁽³³⁾

6.3 Radiación solar ultravioleta y su comportamiento en la ZMVM

Un factor primordial para que ocurra el proceso fotocatalítico, es la presencia de una fuente luminosa ya sea natural o artificial, con el fin de degradar contaminantes orgánicos y otros compuestos inorgánicos tales como NO_x .⁽³⁴⁾ En el caso del TiO_2 la longitud de onda requerida para que se lleve a cabo el proceso fotocatalítico es de $\lambda < 390$ nm, la cual está muy cercana a la luz ultravioleta ($400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 100 \text{ nm}$), por lo que es indispensable entender que es la luz ultravioleta y cuál es su comportamiento en la ZMVM.⁽³⁵⁾

La temperatura en la superficie del sol es de aproximadamente 6000 °K, esto hace que la mayor parte de la radiación que emite tenga una longitud de onda de 2 micrómetros ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$), con un máximo alrededor de 500 nanómetros ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Alrededor del 44% de la energía emitida por el sol tiene una longitud de onda entre 400 y 700 nm, que corresponde a la luz visible. Cerca del 37% de la emisión se encuentra entre 700 y 1500 nm, que corresponde a la radiación infrarroja (IR), y alrededor del 7% de la energía emitida tiene una longitud de onda menor a 400 nm, que corresponde a la radiación ultravioleta (UV).⁽³⁶⁾

Entre más pequeña es la longitud de onda de la radiación, mayor será la cantidad de energía que lleva consigo. La radiación ultravioleta posee más energía que la luz visible, que a su vez tiene más energía

que la luz infrarroja. La energía de la radiación se propaga en pequeños paquetes de energía llamados fotones.⁽³⁶⁾

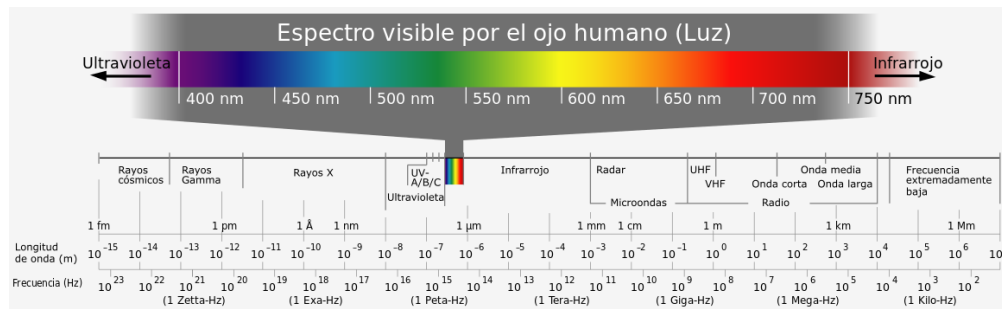


Fig. 6.3 Espectro de Radiación en función de su longitud de onda.⁽³⁷⁾

La radiación solar ultravioleta (UV) se refiere a la radiación emitida por el sol con una longitud de onda (λ) entre 100 y 400 nanómetros. La radiación ultravioleta C (UV-C), que tiene una λ entre los 100 y 280 nm, se absorbe completamente en la atmósfera principalmente en la capa de ozono, este tipo de radiación es nociva para la vida en el planeta. Una fracción de la radiación con λ entre 280 y 320 nm, que corresponde a la ultravioleta B (UV-B), atraviesa la atmósfera, mientras que la mayor parte de la radiación con λ entre 320 y 400 nm, que corresponde a la ultravioleta A (UV-A), alcanza la superficie. Es por esto que en la superficie la intensidad de la radiación UV-A es mayor que la de la radiación UV-B. La radiación se mide en unidades de irradiancia y se define como la cantidad de energía incidente por unidad de tiempo y unidad de área y se expresa en unidades de W/m^2 .⁽³⁸⁾

Por su latitud y altitud la Ciudad de México recibe una cantidad importante de radiación solar, convirtiéndola en una zona idónea para el uso de materiales fotocatalíticos que contengan nanopartículas de dióxido de titanio. En los últimos diez años (2006 – 2016) se ha registrado un promedio anual de radiación UV-A de $2.07 W/m^2$, y en el 2016 se registró un promedio de radiación UV-A de $2.05 W/m^2$, variando la intensidad de la radiación con la declinación solar siendo máxima en el verano y mínima en los meses de invierno. A lo largo del día, la intensidad de la radiación solar UV depende principalmente del ángulo de elevación del sol, aumenta a medida que el sol asciende y es máxima cuando alcanza el punto más alto en el cielo, entre las 12:00 y 14:00 horas.⁽³⁸⁾

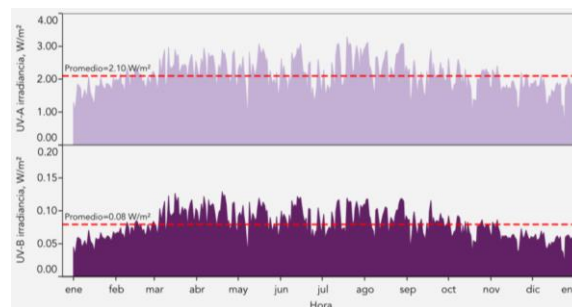


Fig. 6.4 Promedio diario de la irradiancia de la luz ultravioleta A (superior) y B (inferior), entre las 6:00 y 20:00 horas durante 2014. La línea punteada corresponde al valor promedio anual.⁽³⁸⁾

6.4 Proceso Fotocatalítico

El proceso fotocatalítico es similar a la fotosíntesis en las plantas, en el que la clorofila actúa como un catalizador para producir oxígeno a partir de dióxido de carbono y agua. El fotocatalizador en el proceso fotocatalítico corresponde a la clorofila en el proceso de fotosíntesis. Entendiéndose como fotocatalizador una sustancia semiconductor que puede ser activada químicamente por radiación luminosa que da como resultado una reacción de oxidación-reducción (redox). En la figura 6.5 se muestra las similitudes entre la fotosíntesis y el proceso fotocatalítico.⁽³⁹⁾

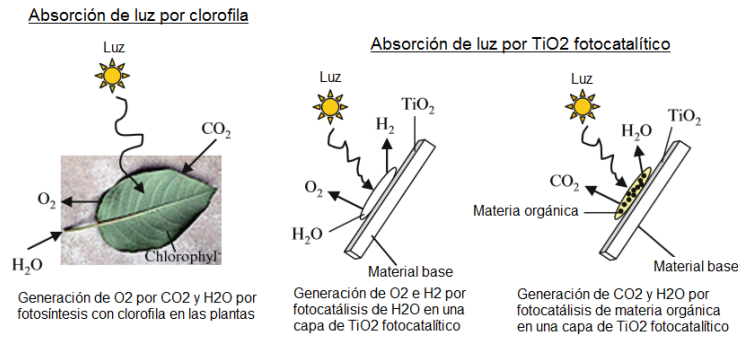


Fig. 6.5 Comparación entre fotocatalisis con TiO₂ y fotosíntesis en plantas.*Nota: en el caso que se encuentre materia orgánica y presencia de H₂O, el que precede es la fotocatalisis de la materia orgánica porque es más rápida que la fotocatalisis de H₂O.⁽³⁹⁾

La fotocatalisis inicia al momento que una superficie cubierta con un fotocatalizador como el TiO₂, entra en contacto con una fuente luminosa ya sea natural o artificial, el cual induce una separación de dos tipos de cargas en el fotocatalizador, la primera de ellas un electrón (e⁻) y la segunda un hueco (h⁺). Para producir estos dos portadores, la energía suficiente debe ser suministrada por un fotón (hν) para promover un electrón (e⁻) de la banda de valencia a la banda de conducción, dejando un hueco (h⁺) detrás en la banda de valencia, como se muestra en la figura 6.6.⁽³⁹⁾

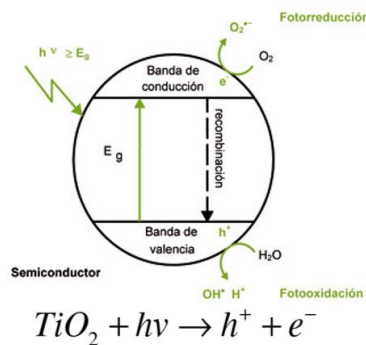


Fig. 6.6 Proceso fotocatalítico, de un semiconductor.

La energía requerida que tiene que ser suministrada por los fotones para la promoción de los electrones depende de la banda prohibida del semiconductor. Siendo la banda prohibida la energía mínima de luz necesaria para hacer el material eléctricamente conductor.⁽³⁹⁾

6.5 Fotocatálisis Heterogénea en superficies cementantes con adiciones de TiO₂

La actividad fotocatalítica del dióxido de titanio ha sido extensivamente estudiada en aplicaciones de esterilización, desinfección y descontaminación. Estudios previos indican que los materiales de construcción que contienen dióxido de titanio, cuando son expuestos a la radiación solar, pueden oxidar eficientemente los contaminantes adsorbidos sobre su superficie, como es el caso de los óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles (COVs), formaldehído, emisiones industriales, entre otros. Especialmente relevantes son los óxidos de nitrógeno (NO_x) que representan algunos de los agentes contaminantes del aire más abundante, directamente relacionado con la formación de smog, generación de ozono y efectos directos sobre la salud humana.⁽⁴⁰⁾

El proceso fotocatalítico en superficies cementantes adicionadas con partículas de TiO₂, inicia al momento que las partículas de TiO₂ son iluminadas por medio de luz natural o artificial con una longitud de onda $\lambda < 390$ nm, la cual está muy cercana a la luz ultravioleta ($400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 100 \text{ nm}$), ocurriendo una excitación de un electrón (e⁻) de la banda de valencia hacia la banda de conducción dejando un hueco (h⁺) en la banda de valencia, generando pares de electrones-huecos, como se muestra en la figura 6.6 y expresado en la ecuación (1).⁽⁴¹⁾



Los huecos electrónicos (h⁺) reaccionan con moléculas donantes adsorbidas como es el caso del agua, generando radicales hidroxilos (OH), los cuales son altamente reactivos, y actúan como receptor de electrones. En cambio el oxígeno presente en el aire reacciona con los electrones para formar los aniones radicales superoxidantes (O₂⁻). Los radicales y los aniones generados sobre la superficie del TiO₂ han demostrado una gran capacidad para degradar diferentes tipos de microorganismos, casi todos los tipos de contaminantes orgánicos y otros compuestos inorgánicos tales como NO_x.⁽⁴²⁾

En lo que corresponde a la fotocatálisis de materia orgánica presente en las fachadas que contienen materiales fotocatalíticos, se presenta una transformación y eliminación del contaminante en partículas de agua (H₂O) y dióxido de carbono (CO₂).⁽³⁹⁾ En cambio se ha demostrado que los gases como el NO_x al final del proceso fotocatalítico, transformar dos moléculas de los óxidos de nitrógeno en una de nitrato de calcio Ca(NO₃)₂, un compuesto que puede ser disuelto y arrastrado por el agua de lluvia posteriormente; el otro compuesto que obtenemos de esta reacción es el ácido carbónico (H₂CO₃) un ácido débil que por ejemplo se utiliza en las bebidas carbonatadas y el cual nos puede ayudar gracias a su acidez a disolver las sustancias orgánicas que ensucian las fachadas.⁽⁴³⁾

El rendimiento fotocatalítico 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.⁽⁴⁴⁾

Actualmente ya existen algunas compañías que comercializan cementos y otros materiales de construcción fotocatalíticos para su aplicación en fachadas, calles, aceras, cubiertas, etc., existiendo múltiples ejemplos de su aplicación en Europa y Japón.⁽⁴⁵⁾

7 Desarrollo experimental

El proceso experimental se divide en dos secciones con el fin de evaluar dos fenómenos diferentes que ocurren al combinar nanopartículas de dióxido de titanio en mezclas de concreto y de mortero, la primera de ellas consistió en evaluar las propiedades descontaminantes en las superficies de las probetas, utilizando como contaminante una solución de azul de metileno. La segunda consistió en evaluar la capacidad que presentan estas probetas al degradar contaminación atmosférica la cual para este trabajo de investigación se utilizará como gas contaminante el dióxido de nitrógeno (NO_2), ya que este gas es uno de los principales gases contaminantes generados en la ZMVM, el cual se forma como subproducto en todas las combustiones llevadas a cabo a altas temperaturas, como es el caso de los procesos de combustión en los vehículos motorizados y las plantas eléctricas.

7.1 Síntesis de nanopartículas de dióxido de titanio

La síntesis de las nanopartículas de dióxido de titanio se llevó a cabo por el método sol gel, usando como precursor isopropóxido de titanio ($\text{Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$) al 97% de la marca Sigma Aldrich, y como disolvente se empleó alcohol etílico ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) al 99% de la marca fermont, mezclado con agua destilada, el procedimiento se realizó como se muestra a continuación.

1. Se mezclaron 230 ml de alcohol etílico con 40 ml de agua destilada, en agitación hasta alcanzar los 50 °C.



Fig. 7.1 Alcohol etílico a la izquierda agua destilada a la derecha.



Fig. 7.2 Alcohol etílico en agitación con agua destilada.

2. Una vez alcanzada la temperatura de 50 °C en la solución del disolvente se adicionaron 250 ml del precursor isopropóxido de titanio, por goteo en un lapso de 4 horas en agitación, esto con el fin de que el precursor no precipite.



Fig. 7.3 isopropóxido de titanio.



Fig. 7.4 Adición del precursor en el disolvente por goteo.

- Posteriormente los soles obtenidos se dejaron añejar durante 24 horas en agitación, a una temperatura de 70 °C.

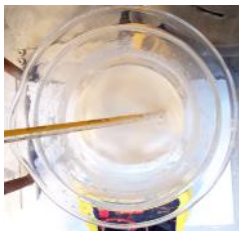


Fig. 7.5 Formación del gel.

- Culminando el añejado de los soles, se formó e gel, el cual fue secado a una temperatura de 70 °C, por 24 horas, para evaporar los restos del disolvente.



Fig. 8.6 Evaporación del disolvente en el gel.

- Posteriormente se procedió a calcinar el gel aumentando la temperatura 50 °C cada media hora, hasta alcanzar los 400 °C.



Fig. 7.7 Calcinación de la muestra.

- Finalmente se pulverizo el dióxido de titanio, obteniendo las nanopartículas de dióxido de titanio.

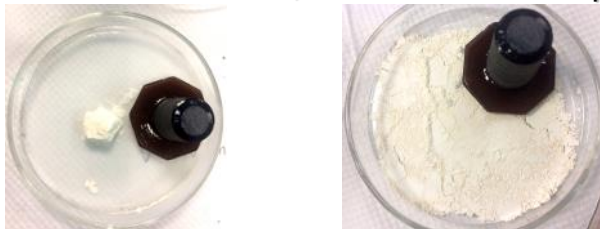


Fig. 7.8 Pulverización del dióxido de titanio.

Por medio de este procedimiento se obtienen aproximadamente 65 gramos de nanopartículas de dióxido de titanio; una vez obtenidas las nanopartículas se analizaron por medio de un difractómetro Bruker DX8 Advanced, con la finalidad de obtener el difractograma de rayos X, el cual nos proporciona la definición de los elementos presentes en la muestra, señalado los picos puntuales del elemento

analizado por medio una gráfica, como se muestra a continuación en los difractogramas obtenidos de las nanopartículas de dióxido de titanio obtenidas.

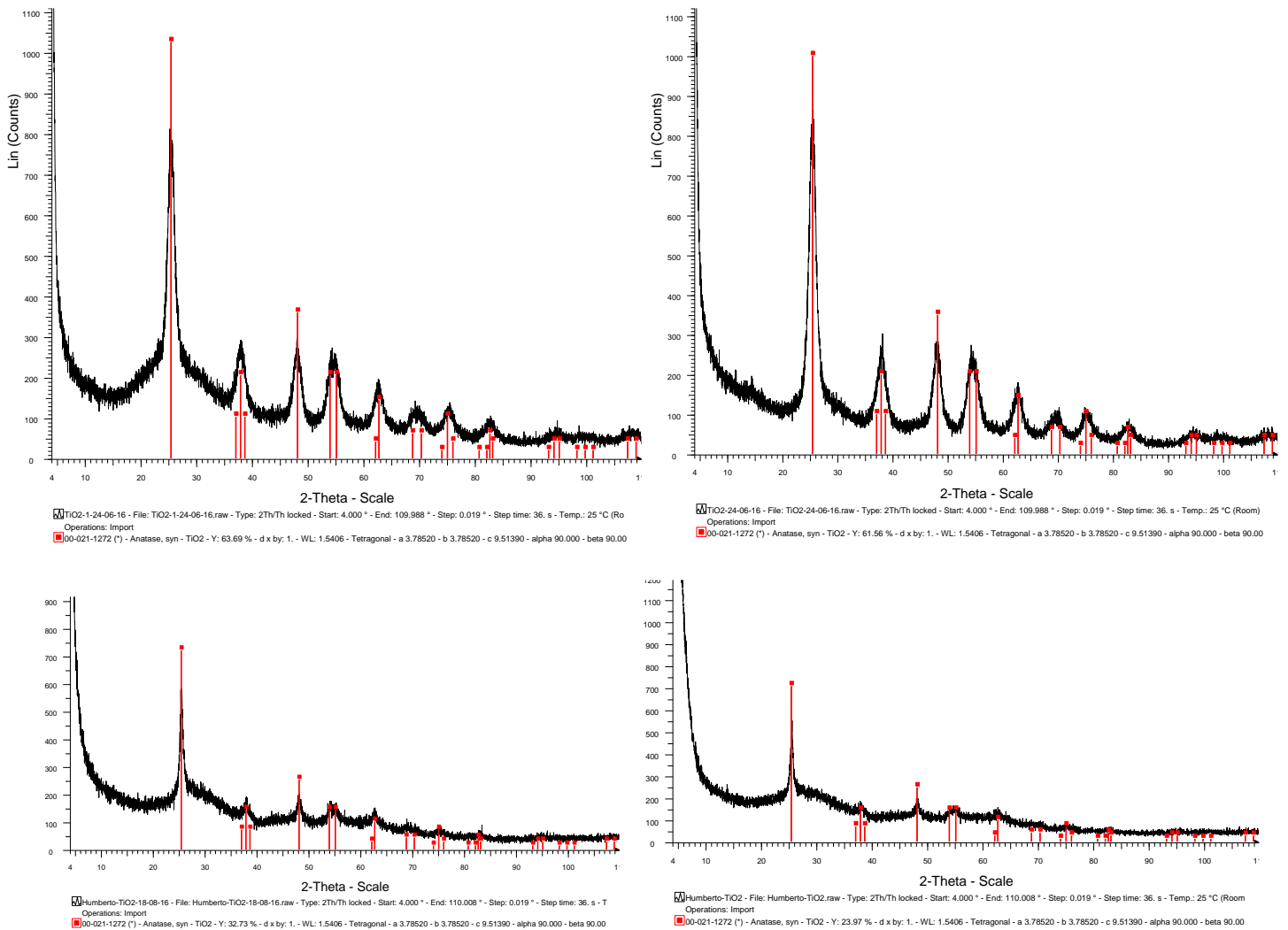


Fig. 7.9 Difractogramas de rayos X de las nanopartículas de dióxido de titanio obtenidas.

En todas los difractogramas se pudo observar que las nanopartículas obtenidas fueron fase anatasa de forma tetragonal.

7.2 Diseño de probetas

Las contaminación atmosférica no solo daña la salud de los seres vivos, sino que también afecta las estructuras creadas por el hombre, como es el caso de las estructuras de concreto y mortero, que se ven afectadas al absorber contaminación atmosférica o sus derivados como la lluvia acida, lo que genera manchas superficiales que las hacen tener aspectos sucios o deteriorados, sin embargo estos contaminantes con el tiempo van penetrando cada vez más en las estructuras generando daños irreparables de las mismas. Por lo que al momento del diseño de las probetas se tomó en cuenta dichas consideraciones; debido a esto las probeta simula un recubrimiento externo de 2.5 cm de espesor en el caso de mortero y como acabado aparente en el caso del concreto.

7.2.1 Consideraciones

Debido a que no existe un método para el diseño de mezclas de mortero para recubrimientos exteriores (aplanados), las consideraciones tomadas en cuenta para su diseño fue evaluando los criterios que existen en las normas oficiales mexicanas, en los manuales, normas y especificaciones de la diferentes entidades gubernamentales de nuestro país, tomando el siguiente criterio para el diseño de la mezcla de mortero:

- a) La conformación de la mezcla de mortero se realizó a base de cemento, arena y agua.
- b) La dosificación de la mezcla se consideró una relación 1:4, con una relación agua-cemento de 0.65, el cual desarrollo una buena trabajabilidad para el mortero.
- c) En relación a la elección del agregado fino, se tomó como base la NMX-C-111-ONNCCE-2004.
- d) El espesor se consideró de 2.5 cm de espesor, asemejando los recubrimientos (aplanados) en el caso del mortero y los acabados aparentes en el caso del concreto.

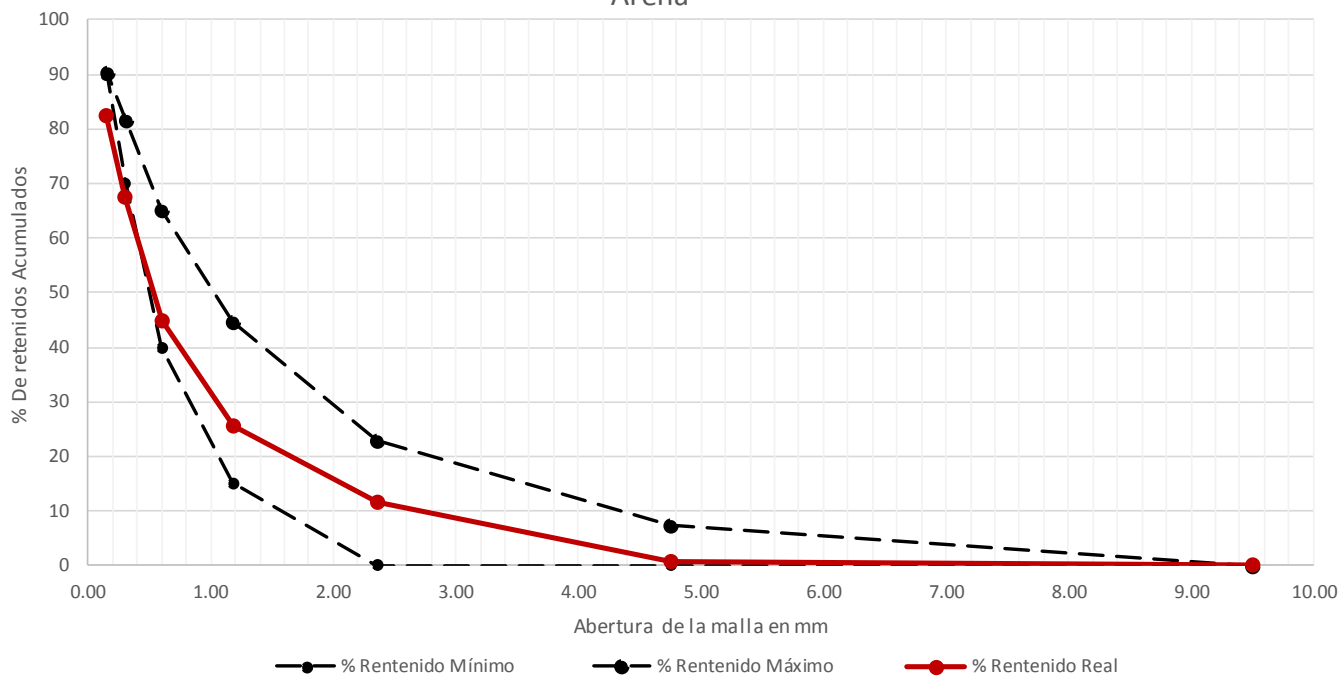
Cabe mencionar que cada dependencia cuenta con diferentes criterios para la aplicación de recubrimientos exteriores, por lo que para el diseño de la mezcla del presente trabajo se llevó a cabo una unificación de criterios, con los cuales se diseñó la mezcla de las probetas de mortero.

Las mezclas de concreto fueron diseñadas por medido del método del ACI, a su vez se utilizaron las Normas Oficiales Mexicanas para evaluar las propiedades de los materiales utilizados.

7.2.2 Propiedades de los agregados utilizados

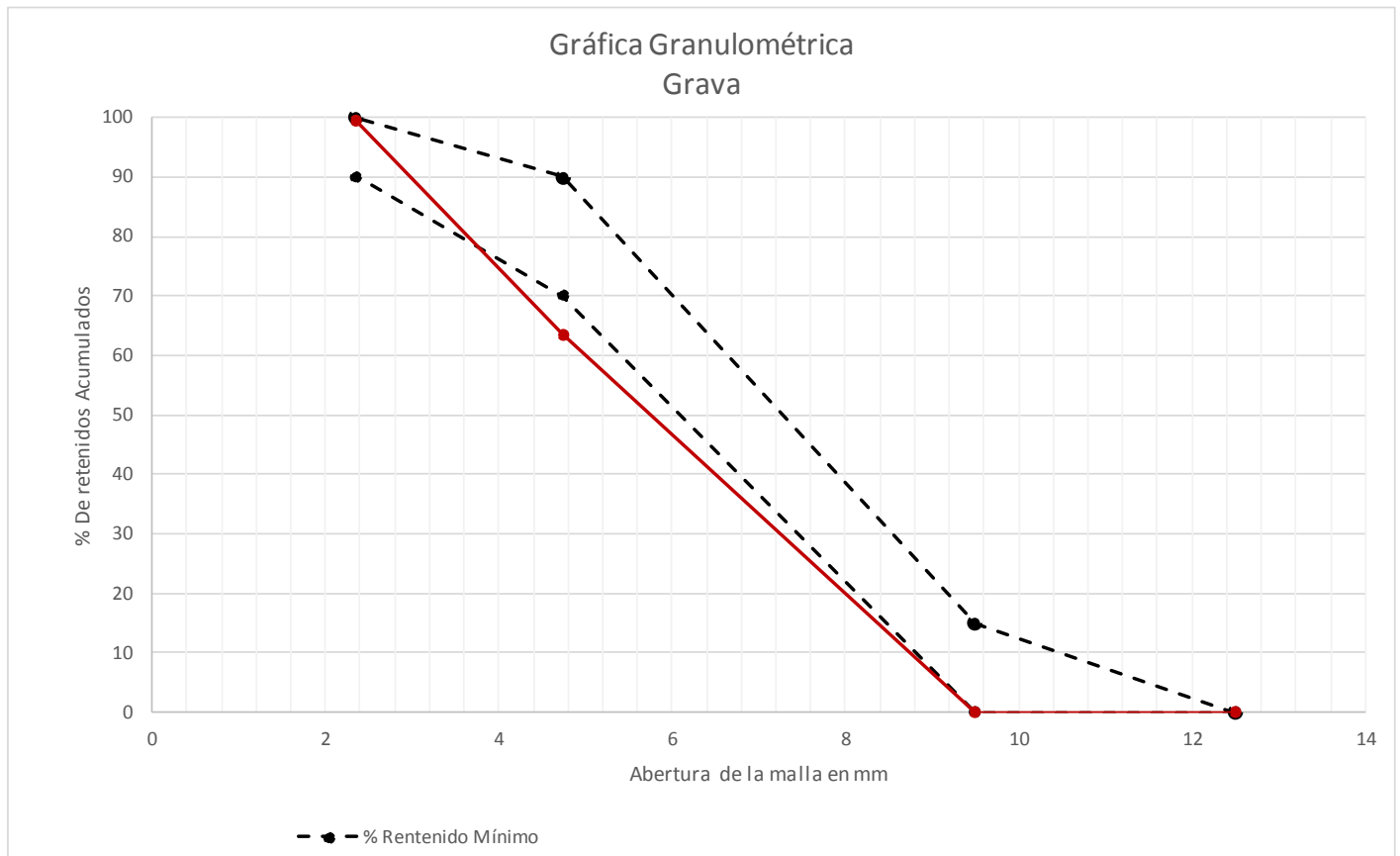
Las propiedades de los agregados tanto para el mortero como para el concreto, fueron evaluadas conforme a las Normas Oficiales Mexicanas (NMX-C-073, NMX-C-077, NMX-C-111, NMX-C-164, NMX-C-165 y NMX-C-170), obteniendo los siguientes resultados:

Gráfica Granulométrica
Arena



Abertura malla (mm)	Nom. ASTM	Retenido en peso (g)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)
9.50	3/8	0	0.00%	0.00%
4.75	4	4	0.68%	0.68%
2.36	8	64	10.96%	11.64%
1.18	16	81	13.87%	25.51%
0.60	30	113	19.35%	44.86%
0.30	50	133	22.77%	67.64%
0.15	100	87	14.90%	82.53%
Charola		102	17.47%	100.00%
Total		584	100%	

Concepto	Cantidad	Unidad
Módulo de Finura	2.33	
Peso específico	2.24	Kg/m ³
Absorción	12.31	%



Abertura malla (mm)	Nom. ASTM	Retenido en peso (g)	Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)
12.5	1/2	0	0.00%	0.00%
9.5	3/8	0	0.00%	0.00%
4.74	No.4	869	63.52%	63.52%
2.36	No.8	491	35.89%	99.42%
1.18	No.16	8	0.58%	100.00%
Charola		0	0.00%	100.00%
Total		1368	100%	

Concepto	Cantidad	Unidad
Peso específico	2.77	Kg/m ³
Peso volumétrico	1529.69	Kg/m ³
Absorción	1.75	%

Una vez realizadas las pruebas de los agregados a utilizar en base a la NMX, se procedió a realizar el diseño de las mezclas de mortero y concreto, tomando en cuenta las consideraciones del apartado 7.2.1.

7.2.3 Diseño de mezcla

La mezcla de mortero se realizó a base de cemento, arena y agua, con una proporción de 1:4 y con una relación agua-cemento de 0.65, el cual desarrollo una buena trabajabilidad para el mortero, en comparación de otras pastas realizadas, a continuación en la tabla 7.1, se presenta la dosificación utilizada para las probetas de mortero.

Dosificación mortero (1 m ³)						
Material	Mortero sin TiO ₂		Mortero con 5 % TiO ₂		Mortero con 10% TiO ₂	
	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad
Cemento	323.36	Kg	323.36	Kg	323.36	Kg
Arena	1293.45	Kg	1293.45	Kg	1293.45	Kg
Agua	210.19	Lts	210.19	Lts	210.19	Lts
TiO ₂	0	Kg	16.17	Kg	32.34	Kg

TABLA 7.1: DOSIFICACIÓN MEZCLA DE MORTERO.

La mezcla de concreto se realizó a base de cemento, grava, arena y agua, en base al método del ACI.

Dosificación concreto (1 m ³)						
Material	Mortero sin TiO ₂		Mortero con 5 % TiO ₂		Mortero con 10% TiO ₂	
	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad
Cemento	369.44	Kg	369.44	Kg	369.44	Kg
Arena	768	Kg	768	Kg	768	Kg
Grava	775.55	Kg	775.55	Kg	775.55	Kg
Agua	228	Lts	228	Lts	228	Lts
TiO ₂	0	Kg	18.47	Kg	36.94	Kg

TABLA 7.2: DOSIFICACIÓN MEZCLA DE CONCRETO.

7.2.4 Elaboración de las probetas

7.2.4.1 Elaboración de probetas de mortero

Para la elaboración de las mezclas de mortero, se llevó a cabo el procedimiento indicado por norma NMX-C-085⁽⁴⁶⁾, que tiene como título; determinación estándar para el mezclado de pastas y morteros de cementantes hidráulicos, el cual se describe a continuación:

- 1) Se introdujo toda el agua de mezclado en el recipiente.
- 2) Posteriormente se agregó el cemento al agua y se mezcló a baja velocidad (140 ± 5 rpm) durante 30 segundos.
- 3) Finalizando el segundo paso se agregó lentamente la totalidad de la arena en un lapso de 30 segundos, mientras la mezcladora funciona a baja velocidad.



Fig. 7.11 Mezclado de cemento, arena y agua.

- 4) En el caso de los morteros adicionados con nanopartículas de dióxido de titanio, en este paso se procedió a la adición de las nanopartículas, en un lapso de 5 segundos.

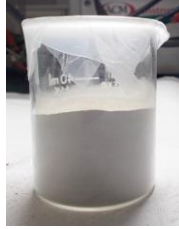


Fig. 7.12 Porción agregada de nanopartículas de dióxido de titanio.

- 5) Una vez colocados todos los materiales de la mezcla, se detuvo la mezcladora y se cambió a velocidad rápida (285 ± 10 rpm), dejando mezclar durante 30 segundos.
- 6) Culminado el paso cinco se detuvo la mezcladora durante un periodo de 90 segundos, en los cuales los primeros 15 segundos de este intervalo, se arrastró rápidamente hacia el fondo, el mortero que se había adherido a las paredes.
- 7) Posteriormente se mezcló a velocidad rápida (285 ± 10 rpm), durante 60 segundos, tapando muy bien la mezcladora con el fin de evitar la pérdida de humedad.



Fig. 7.13 Mezclado final de la pasta de mortero.

- 8) Una vez concluido el mezclado de la pasta de mortero, se procedió a colocar la pasta en la cimbra, extrayendo el contenido de aire de las probetas golpeando la base de la cimbra con un mazo de goma.



Fig. 7.14 Llenado de moldes.

- 9) Habiendo extraído el aire de las probetas se procedió a dar el acabado final a las mismas; teniendo como base dos tipos de acabado uno rugoso y uno pulido, en ambos casos se utilizó una regleta de madera para retirar el exceso de mezcla y dar un acabado rugoso a la misma; en el caso del terminado pulido, habiendo pasado 1 hora se procedió a pulir el acabado remojando una cuchara de albañil metálica y pasándola por la superficie para dar el acabado pulido.
- 10) Finalmente se ingresaron las probetas frescas al cuarto de curado las cuales fueron descimbradas al día siguiente.



Fig. 7.15 Probetas en cuarto de curado.

7.2.4.2 Elaboración de probetas de concreto

Para la elaboración de las mezclas de concreto, se llevó a cabo el procedimiento indicado por norma, NMX-C-159⁽⁵⁷⁾ que tiene como título; Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio, apartado 8.1.2 de la norma, el cual corresponde al mezclado a mano, debido a que el volumen de la mezcla elaborada es muy pequeño; a continuación se describe a continuación:

- 1) Se mezcló cemento y agregado fino con la ayuda de un cucharón en una charola, limpia y húmeda, hasta lograr una combinación uniforme.
- 2) Posteriormente se agregó agregado grueso y se mezcló toda la revoltura, hasta lograr su distribución uniforme.
- 3) Finalizando el segundo paso, para el caso de concretos adicionados con nanopartículas de dióxido de titanio, se procedió a la adición de las nanopartículas y se mezcló toda la revoltura, hasta lograr su distribución uniforme.
- 4) .Una vez colocados todos los materiales de la mezcla, se agregó agua y se mezcló hasta obtener un concreto homogéneo en apariencia y de la consistencia deseada.
- 5) Finalizando el mezclado, se repitieron los pasos 8,9 y 10 del apartado anterior.

7.3 Pruebas de autolimpieza superficial de azul de metileno

Desde 1996 se han venido desarrollando pruebas de laboratorio con el fin de conocer las propiedades de autolimpieza en materiales a base de cemento que contienen nanopartículas de TiO_2 , esto ha generado que algunos países principalmente de la unión Europea y Asia, hayan desarrollado sus propias normas, con el fin de garantizar las propiedades de autolimpieza que presentan los materiales fotocatalíticos.

En el presente año entro en vigor la norma oficial mexicana NMX-C-516-ONNCCE-2016, la cual tiene como nombre: Materiales fotocatalíticos, métodos de ensayo para la evaluación de la actividad superficial; sin embargo esta norma está enfocada hacia actividad fotocatalítica en medio acuoso, por lo que en el diseño experimental tomo como referencia alguno criterios indicados en esta norma, y se complementó con la norma italiana UNI 11259: 2008, que tiene como nombre: Determinazione dell'attività fotocatalitica di leganti idraulici, Metodo della rodamina.

7.3.1 Procedimiento experimental de autolimpieza de azul de metileno

El procedimiento realizado para el ensayo de autolimpieza de azul de metileno se describe a continuación:

1. Como primer paso se acondiciono la solución de azul de metileno que sirvió como contaminante en la superficie de las probetas. La solución de azul de metileno se acondiciono tomando como base la norma NMX-C-516; mezclando 0.01 gramo de azul de metileno en 1 litro de agua destilada.



Fig. 7.16 Acondicionamiento solución de azul de metileno.

2. Una vez obtenida la solución de azul se colocó con una pipeta, 9 ml de solución de azul de metileno previamente preparada, en una caja Petri.
3. Las probetas fueron sumergidas individualmente en una caja Petri con la solución de azul de metileno durante diez minutos en el caso de las mezclas de mortero y treinta minutos en el caso de las mezclas de concreto.

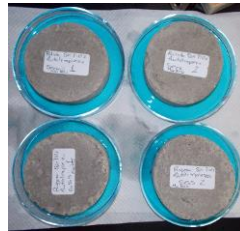


Fig. 7.17 Probetas sumergidas en azul de metileno.

4. Posteriormente se retiraron las probetas de la caja Petri y se dejaron secar a temperatura ambiente durante treinta minutos.
5. Pasando los treinta minutos de secado a temperatura ambiente, se procedió a colocar las probetas dentro del fotoreactor el cual es de forma rectangular de madera con dimensiones de; 65 cm de altura, 34cm de largo y 43 cm de ancho, las paredes del mismo con 1 cm de espesor, como lo indica la norma NMX-C-516-ONNCCE-2016.
6. Una vez introducidas las probetas dentro del fotoreactor, se inició la irradiación de luz UV-A por medio de una lámpara de luz ultravioleta con una longitud de onda de $\lambda = 365\text{nm}$ y con una intensidad de irradiación E de 0.023 W/m^2 , siendo aproximadamente el 11% de la irradiancia promedio anual y correspondiendo entre las 6 am – 7am y 7pm - 8pm del perfil promedio diario de la intensidad de la radiación solar ultravioleta A.



Fig. 7.18 Irradiación de luz UV-A a las probetas.

7. La norma UNI 11259: 2008, menciona que se debe de hacer mediciones con un colorímetro de la superficie estudiada a las cuatro horas y posteriormente a las 26 horas, sin embargo como en el presente proyecto no se contaba con un colorímetro se construyó una caja de luz por donde se tomaron fotografías de las probetas para posteriormente ser evaluadas por medio del programa GIMP; cabe mencionar que adicionalmente se llevó a cabo la captura de fotografías de las 0 horas a las 4 horas de experimentación con el fin de tener un reporte más exacto del proceso experimental.



Fig. 7.19 Caja de luz para la toma de fotografías.

8. Medición de color en las probetas se realizó por medio de la evaluación de las fotografías capturadas en la caja de luz, obteniendo coordenadas RGB que posteriormente se convirtieron a coordenadas Lab. La foto-degradación del colorante fue monitoreada realizando mediciones de color, las cuales están basadas en el parámetro b^* del sistema de color CIE $L^*a^*b^*$ (Commission Internationale de l'Eclairage). Este sistema descompone cualquier medición del color en tres factores. (L^*) representa la luminosidad con valores entre blanco y negro, (a^*) hace lo mismo con los valores entre rojo y verde, mientras que (b^*) hace lo mismo con valores entre azul y amarillo.

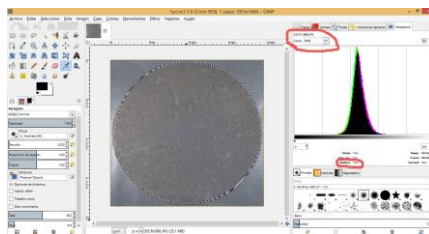


Fig. 7.20 Medición de coordenadas RGB por medio del programa GIMP.

7.3.2 Resultados de autolimpieza superficial de azul de metileno

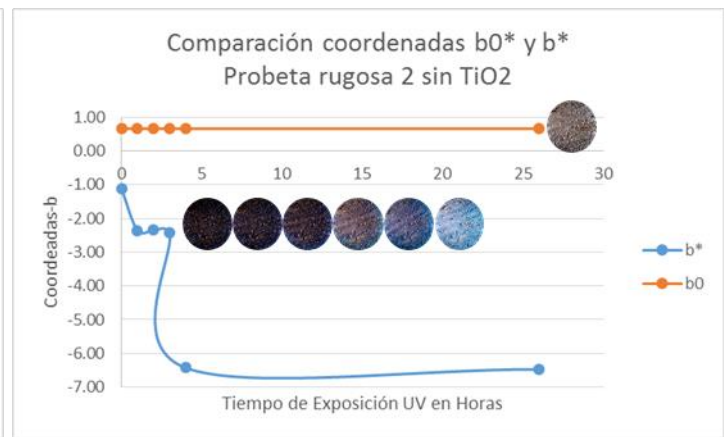
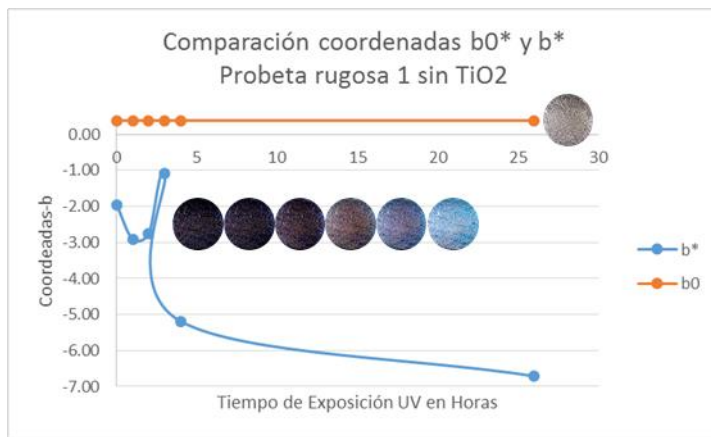
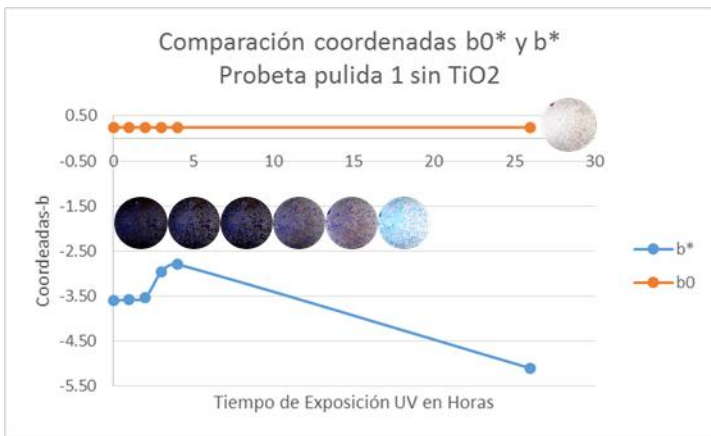
Los ensayos de autolimpieza se llevaron a cabo en probetas a base de cemento portland y con dos tipos de acabados superficiales, uno rugoso y el otro pulido; a su vez se han realizado las evaluaciones en dos tipos de estados de las probetas, uno que corresponde a temperatura ambiente con la humedad absorbida del mismo y la otra en estado saturado superficialmente seco, esto con el fin de asemejar

las condiciones climatológicas que se encuentran en la ZMVM, donde se sabe que la temporada de lluvias abarca desde el mes de Abril hasta Octubre, y el resto de meses son secos, siendo el mes de Febrero el más seco del año y los meses de Junio a Agosto los más húmedos.

Las mediciones de color en las probetas se realizaron por medio del reporte fotográfico donde se evaluaron por medio del programa GIMP en el cual se obtuvieron las coordenadas RGB que posteriormente se transformaban a coordenadas Lab; cabe mencionar que la coordenada evaluada en el presente trabajo es la (b*) debido a que esta coordenada mide el color azul en sus valores negativos, y en el caso de este trabajo de investigación se utilizó azul de metileno para manchar las probetas evaluadas.

Reporte fotográfico de degradación de azul de metileno en probetas de mortero hechas a base de cemento gris sin adición de dióxido de titanio, con humedad del 9.2%.								
Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
Tiempo de Exposición	Pulida 1		Pulida 2		Rugosa 1		Rugosa 2	
	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

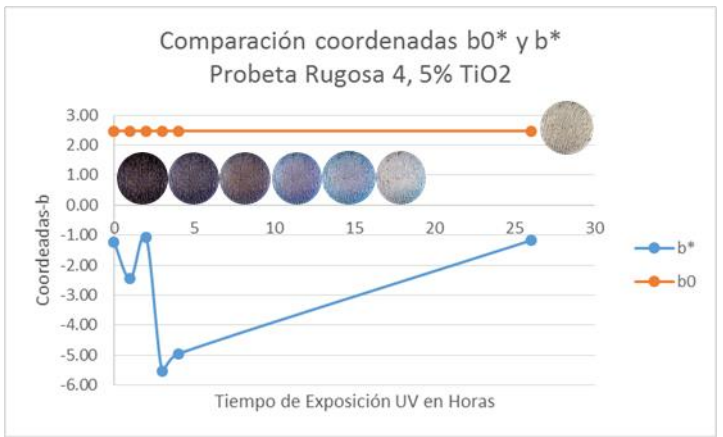
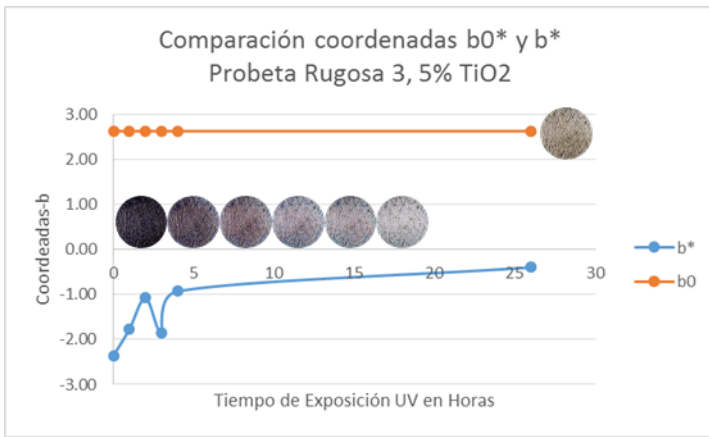
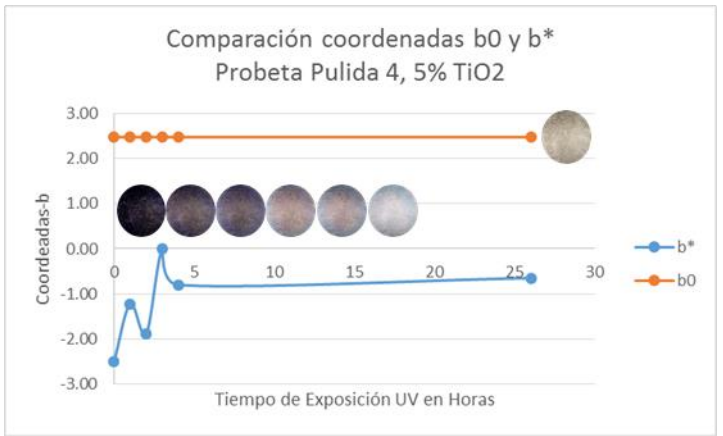
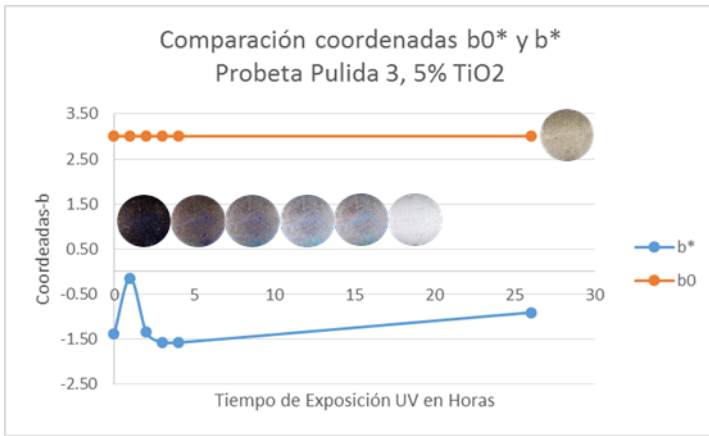
Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de mortero hechas a base de cemento gris sin adición de dióxido de titanio, con humedad del 9.2%.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 1 sin TiO2			Probeta Pulida 2 sin TiO2			Probeta Rugosa 1 sin TiO2			Probeta Rugosa 2 sin TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	47.22	2.21	-3.60	47.99	2.00	-3.04	46.73	1.59	-1.95	44.85	2.16	-1.13
1	49.22	2.20	-3.58	53.93	1.95	-2.98	47.28	2.38	-2.91	46.84	2.18	-2.37
2	52.78	2.17	-3.53	59.67	2.07	-6.47	49.36	2.74	-2.75	48.85	2.16	-2.35
3	55.49	1.94	-2.96	62.04	0.32	-4.05	55.18	2.08	-1.09	54.68	1.74	-2.43
4	58.67	2.28	-2.80	62.29	-1.92	-5.42	56.72	0.75	-5.19	54.37	0.83	-6.43
26	67.72	-1.21	-5.10	67.72	0.26	-2.83	61.82	-2.17	-6.71	61.97	-1.49	-6.47
INICIAL	67.90	0.72	0.25	63.30	0.36	0.12	60.42	1.10	0.39	56.35	1.86	0.66



Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	Sin TiO2			
% Degradación	Pulida 1	Pulida 2	Rugosa 1	Rugosa 2
R-4	22.34	-78.26	-166.12	-470.25
R-26	-41.61	6.87	-244.08	-474.16

Reporte fotográfico de degradación de azul de metileno en probetas de mortero hechas a base de cemento gris adicionadas con 5% de dióxido de titanio, con humedad del 8.6%.								
Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
Tiempo de Exposición	Pulida 3		Pulida 4		Rugosa 3		Rugosa 4	
	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

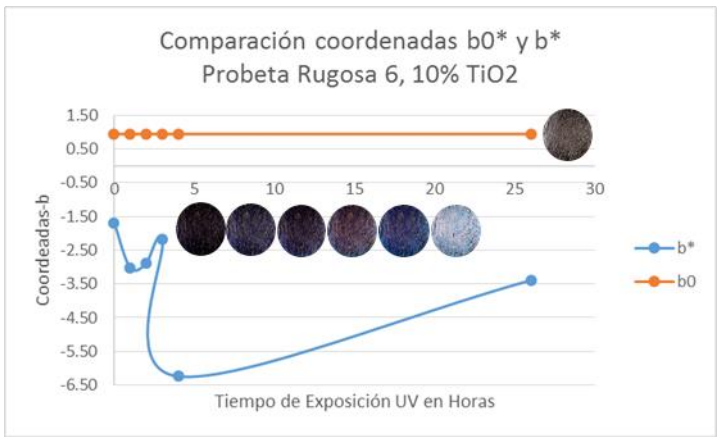
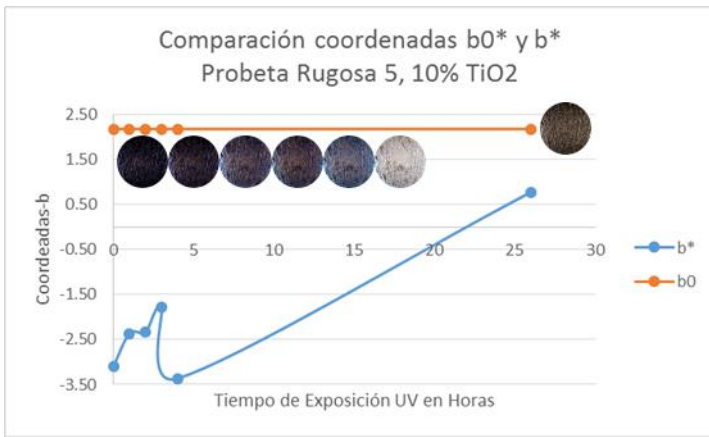
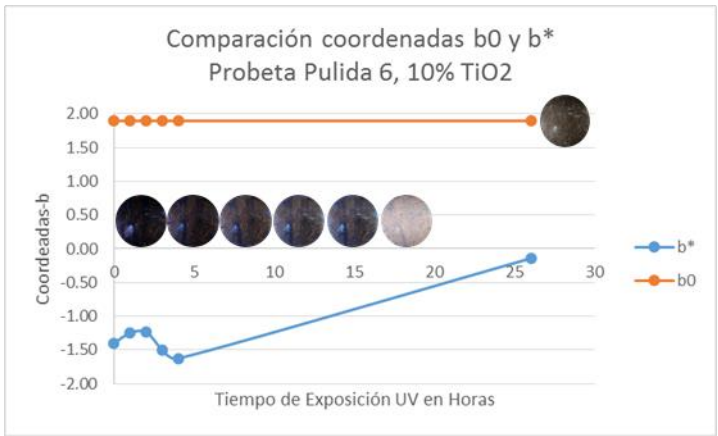
Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de mortero hechas a base de cemento gris adicionadas con 5% de dióxido de titanio, con humedad del 3.6%.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 3 5% TiO2			Probeta Pulida 4 5% TiO2			Probeta Rugosa 3 5% TiO2			Probeta Rugosa 4 5% TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	48.30	1.37	-1.39	46.76	1.80	-2.50	47.25	2.17	-2.36	47.97	3.49	-1.25
1	55.04	1.32	-0.14	53.92	1.72	-1.23	53.95	1.92	-1.77	52.72	1.76	-2.45
2	58.50	1.32	-1.34	55.43	1.54	-1.89	57.51	2.06	-1.08	55.18	2.08	-1.09
3	62.55	0.58	-1.58	60.91	1.66	-0.01	61.21	1.51	-1.85	59.15	1.30	-5.55
4	62.17	0.58	-1.58	61.16	1.12	-0.80	61.84	0.75	-0.93	61.45	-0.53	-4.96
26	67.88	0.74	-0.91	65.06	-0.17	-0.65	64.47	0.55	-0.40	63.96	0.03	-1.18
INICIAL	62.95	0.16	3.01	63.36	0.34	2.48	61.16	0.72	2.63	64.12	0.34	2.47



Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	5% TiO2			
% Degradación	Pulida 3	Pulida 4	Rugosa 3	Rugosa 4
R-4	-13.86	68.04	60.73	-298.07
R-26	34.35	73.99	83.12	5.59

Reporte fotográfico de degradación de azul de metileno en probetas de mortero hechas a base de cemento gris adicionadas con 10% de dióxido de titanio, con humedad del 9.9%.								
Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
Tiempo de Exposición	Pulida 5		Pulida 6		Rugosa 5		Rugosa 6	
	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

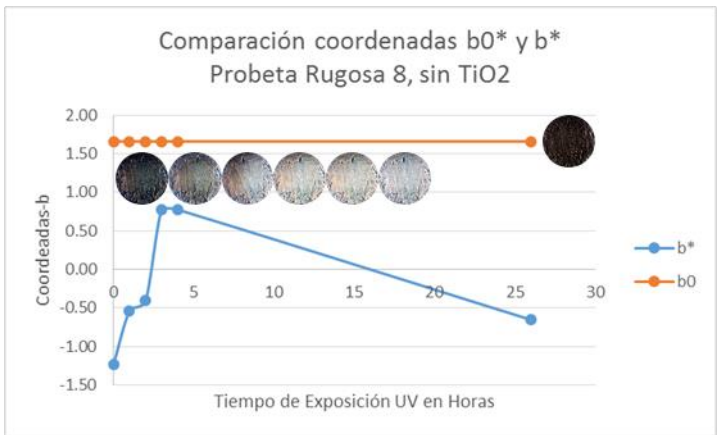
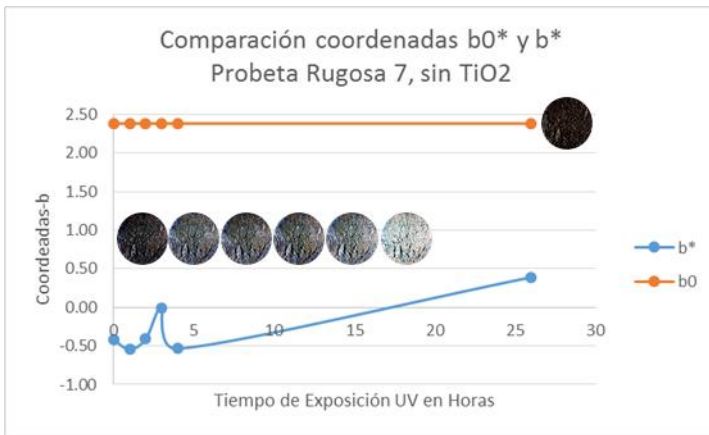
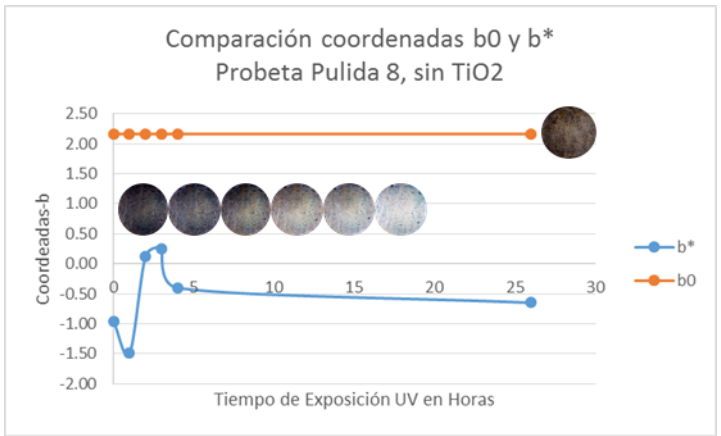
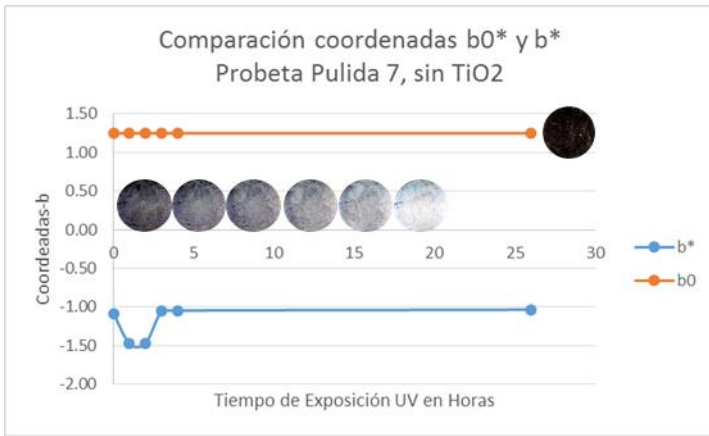
Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de mortero hechas a base de cemento gris adicionadas con 10% de dióxido de titanio, con humedad del 9.9%.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 5 10% TiO2			Probeta Pulida 6 10% TiO2			Probeta Rugosa 5 10% TiO2			Probeta Rugosa 6 10% TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	44.65	1.19	-0.85	46.70	1.38	-1.40	43.96	2.03	-3.09	44.88	2.37	-1.69
1	49.95	1.54	-0.70	48.79	1.75	-1.25	46.84	2.18	-2.37	49.59	1.98	-3.02
2	52.91	0.57	-0.41	51.96	1.73	-1.23	51.62	2.14	-2.32	48.88	2.37	-2.90
3	54.09	0.57	-0.41	53.36	0.97	-1.49	51.20	1.94	-1.78	52.10	2.51	-2.18
4	54.82	0.40	-1.08	53.67	0.60	-1.62	54.46	0.85	-3.36	51.39	1.57	-6.24
26	64.12	0.75	-0.92	63.87	1.28	-0.14	64.12	0.53	0.77	63.23	0.47	-3.39
INICIAL	53.42	0.93	0.94	52.49	0.17	1.89	51.48	0.94	2.17	53.42	0.93	0.94



































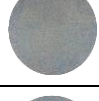
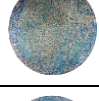

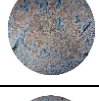
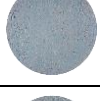
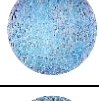


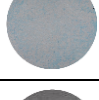
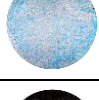
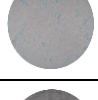
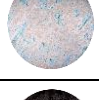

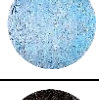
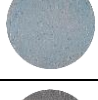
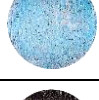








Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	10% TiO2			
% Degradación	Pulida 5	Pulida 6	Rugosa 5	Rugosa 6
R-4	-27.43	-16.40	-8.82	-270.15
R-26	-8.62	89.85	125.05	-101.31

Reporte fotográfico de degradación de azul de metileno en probetas de mortero hechas a base de cemento gris sin adición de dióxido de titanio, en estado saturado superficialmente seco.								
Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
Tiempo de Exposición	Pulida 7		Pulida 8		Rugosa 7		Rugosa 8	
	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

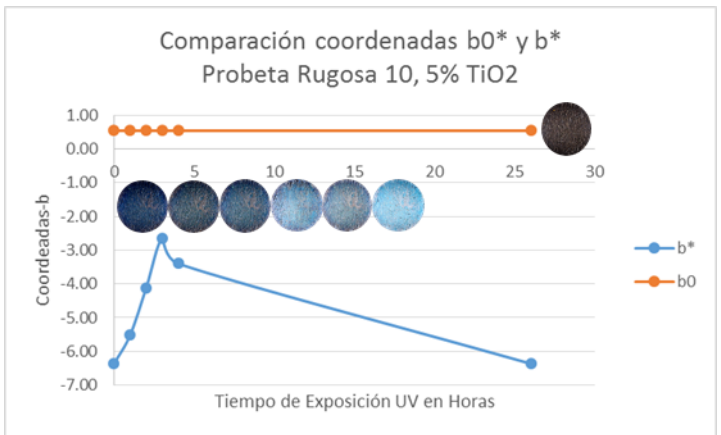
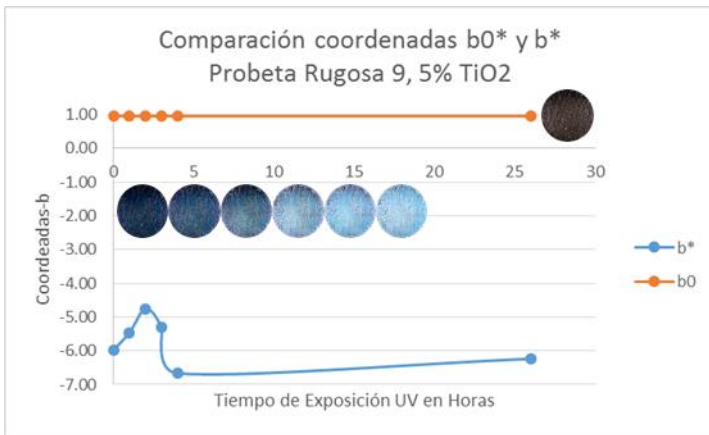
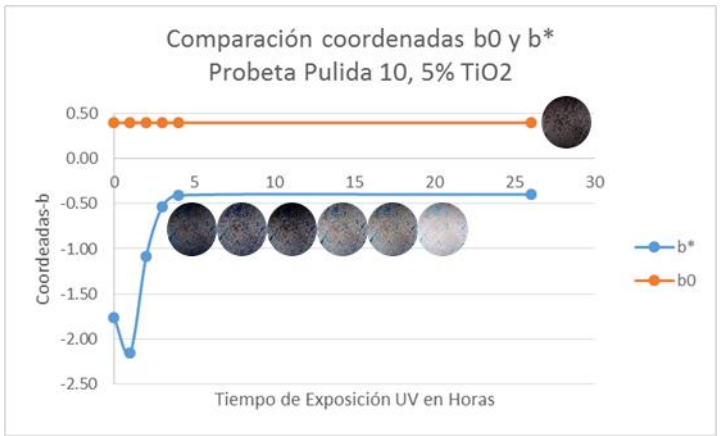
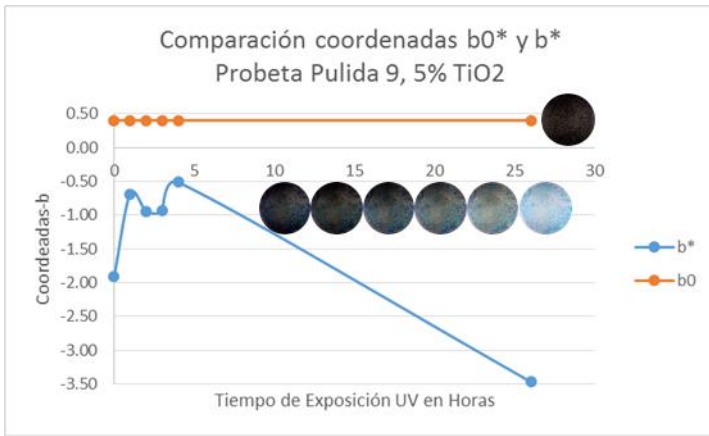
Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de mortero hechas a base de cemento gris sin adición de dióxido de titanio, muestra sss.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 7 sin TiO2			Probeta Pulida 8 sin TiO2			Probeta Rugosa 7 sin TiO2			Probeta Rugosa 8 sin TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	53.64	0.40	-1.08	51.37	0.78	-0.96	48.16	0.58	-0.42	50.41	0.03	-1.23
1	56.87	0.96	-1.48	54.15	0.97	-1.49	54.40	0.20	-0.54	57.12	0.20	-0.54
2	58.42	0.96	-1.47	55.62	0.37	0.13	54.09	0.57	-0.41	61.05	0.56	-0.40
3	61.38	0.39	-1.06	60.72	0.73	0.25	54.76	0.00	0.00	64.49	0.53	0.77
4	64.41	0.39	-1.05	62.57	0.56	-0.40	58.66	0.20	-0.54	64.49	0.53	0.77
26	68.17	0.38	-1.04	65.82	-0.17	-0.65	65.38	-0.55	0.39	64.68	-0.17	-0.65
INICIAL	45.64	1.75	1.25	53.06	0.93	2.16	44.36	1.37	2.38	46.73	1.15	1.66



Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	Sin TiO2			
% Degradación	Pulida 7	Pulida 8	Rugosa 7	Rugosa 8
R-4	3.46	58.28	-27.31	162.88
R-26	4.53	32.38	192.68	47.00

Reporte fotográfico de degradación de azul de metileno en probetas de mortero hechas a base de cemento gris adicionadas con 5% de dióxido de titanio, en estado saturado superficialmente seco.								
Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
Tiempo de Exposición	Pulida 9		Pulida 10		Rugosa 9		Rugosa 10	
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

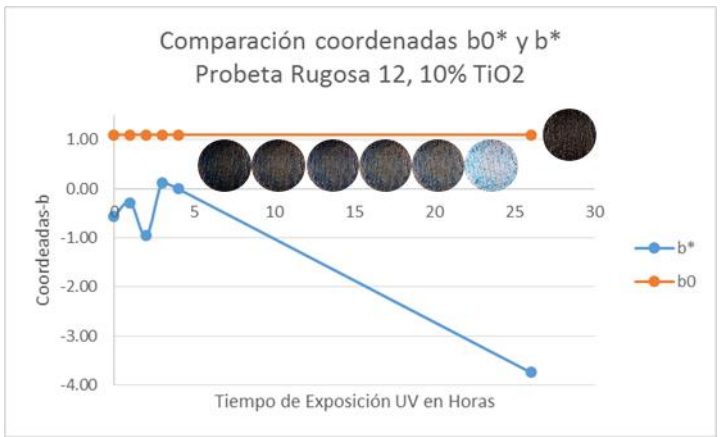
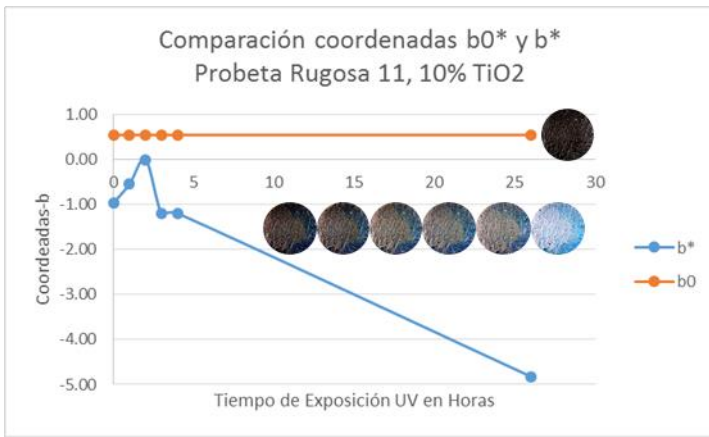
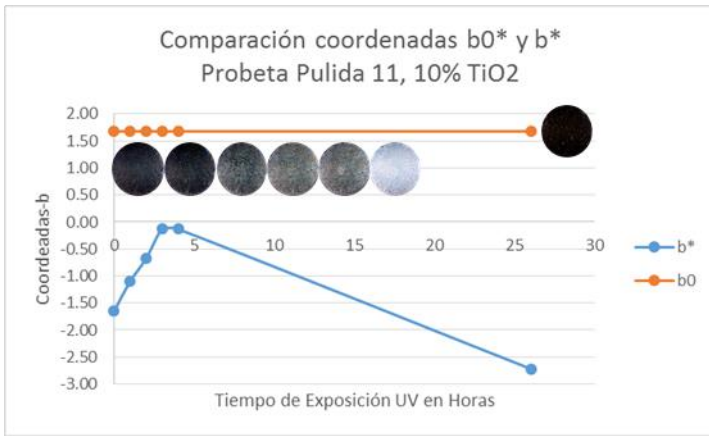
Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de mortero hechas a base de cemento gris adicionadas con 5% de dióxido de titanio, muestra sss.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 9 5% TiO2			Probeta Pulida 10 5% TiO2			Probeta Rugosa 9 5% TiO2			Probeta Rugosa 10 5% TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	49.56	-0.14	-1.91	51.62	0.24	-1.77	48.46	-1.02	-5.98	50.16	-0.44	-6.36
1	49.58	-0.17	-0.69	55.26	0.80	-2.15	53.10	-1.59	-5.46	52.66	0.05	-5.52
2	52.19	-0.92	-0.94	52.46	0.40	-1.09	55.88	-1.45	-4.76	54.76	-1.31	-4.12
3	55.32	-0.91	-0.93	59.05	0.20	-0.53	62.37	-1.57	-5.30	56.11	-0.66	-2.66
4	59.47	-1.46	-0.51	58.75	0.56	-0.41	64.10	-2.16	-6.66	59.84	-1.16	-3.40
26	65.08	-1.49	-3.47	65.22	0.55	-0.40	65.50	-2.71	-6.24	64.68	-3.05	-6.37
INICIAL	47.90	1.15	0.41	51.48	1.14	0.40	50.26	0.94	0.95	50.38	1.52	0.54



Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	5% TiO2			
% Degradación	Pulida 9	Pulida 10	Rugosa 9	Rugosa 10
R-4	73.20	77.07	-11.53	46.51
R-26	-81.23	77.51	-4.38	-0.13

Reporte fotográfico de degradación de azul de metileno en probetas de mortero hechas a base de cemento gris adicionadas con 10% de dióxido de titanio, en estado saturado superficialmente seco								
Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
Tiempo de Exposición	Pulida 11		Pulida 12		Rugosa 11		Rugosa 12	
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

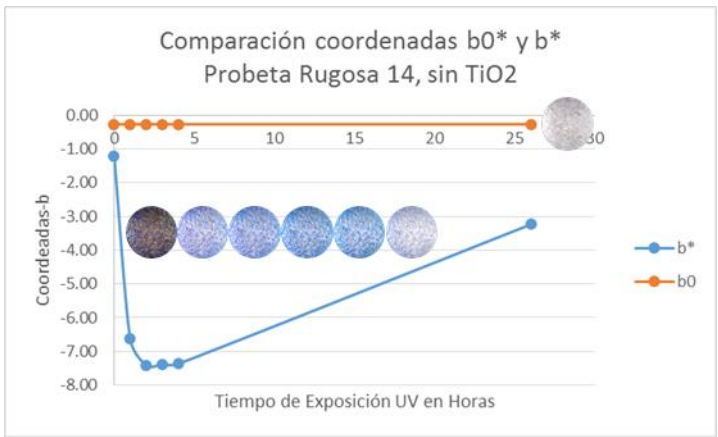
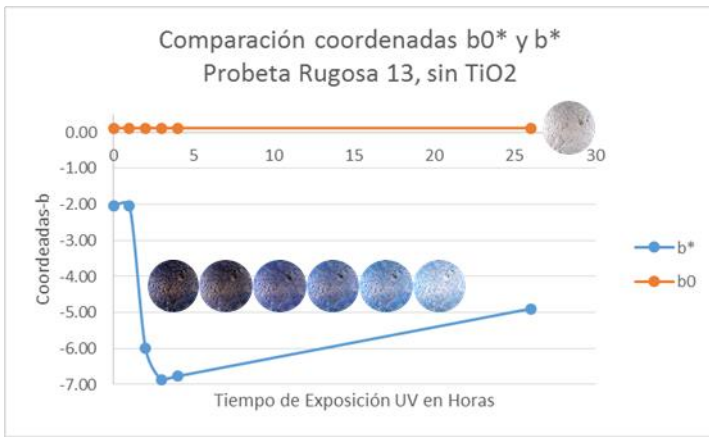
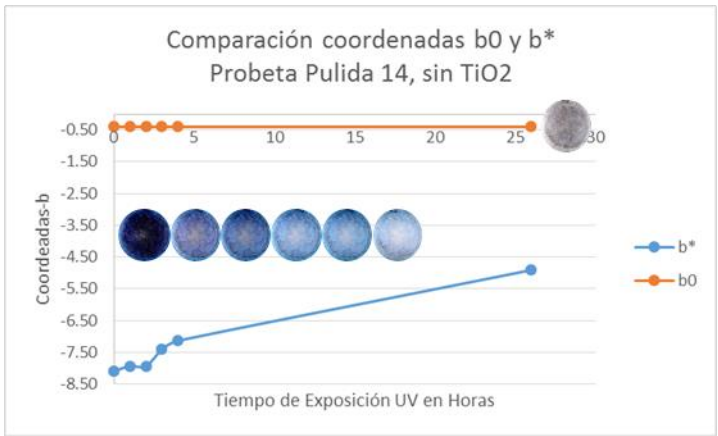
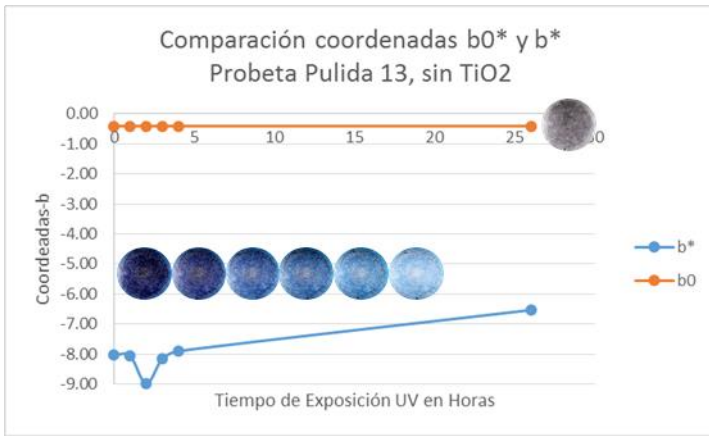
Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de mortero hechas a base de cemento gris adicionadas con 10% de dióxido de titanio, muestra sss.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 11 10% TiO2			Probeta Pulida 12 10% TiO2			Probeta Rugosa 11 10% TiO2			Probeta Rugosa 12 10% TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	49.72	0.61	-1.65	52.58	0.98	-1.50	49.78	0.78	-0.97	47.67	0.20	-0.56
1	49.30	0.41	-1.10	55.82	1.53	-1.89	52.44	0.20	-0.55	50.63	0.96	-0.28
2	54.31	-0.17	-0.67	54.98	1.14	-0.82	55.54	0.00	0.00	51.76	0.78	-0.96
3	57.40	-0.37	-0.13	57.78	1.50	-0.68	56.29	0.03	-1.20	53.67	0.37	0.13
4	58.17	-0.37	-0.13	59.98	0.93	-0.27	58.22	0.03	-1.20	55.15	0.00	0.00
26	66.30	0.61	-2.72	66.08	1.10	-0.79	64.88	3.03	-4.82	65.27	-0.59	-3.74
INICIAL	43.90	1.17	1.68	48.61	0.76	0.27	47.59	1.54	0.54	47.16	1.35	1.10



Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	10% TiO2			
% Degradación	Pulida 11	Pulida 12	Rugosa 11	Rugosa 12
R-4	91.93	81.72	-23.86	99.33
R-26	-65.04	47.41	-398.83	-572.54

Reporte fotográfico de degradación de azul de metileno en probetas de concreto hechas a base de cemento gris sin adición de dióxido de titanio, con humedad del 3.5%.								
Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
Tiempo de Exposición	Pulida 13		Pulida 14		Rugosa 13		Rugosa 14	
	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

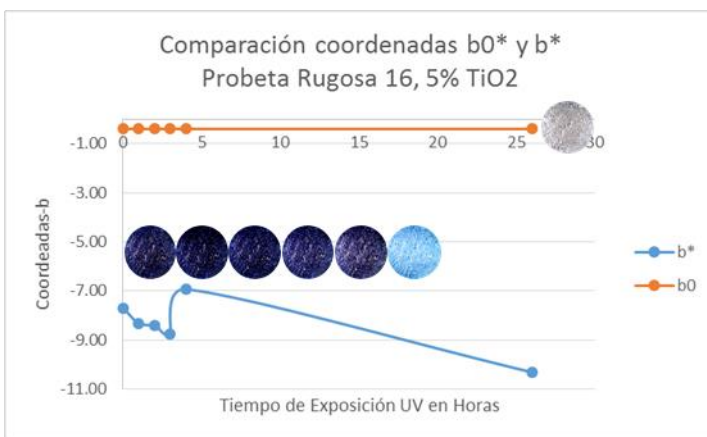
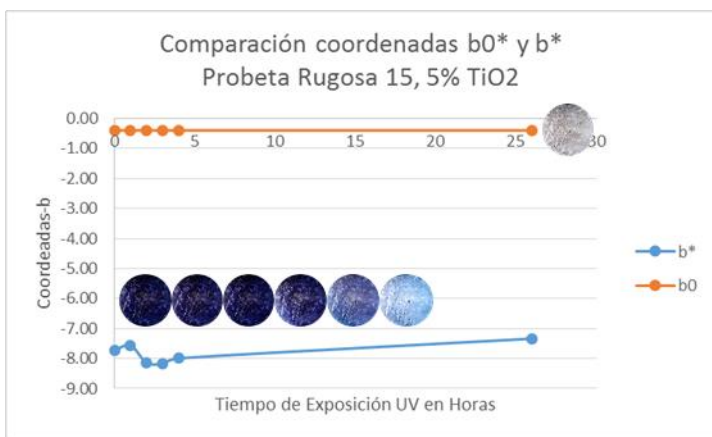
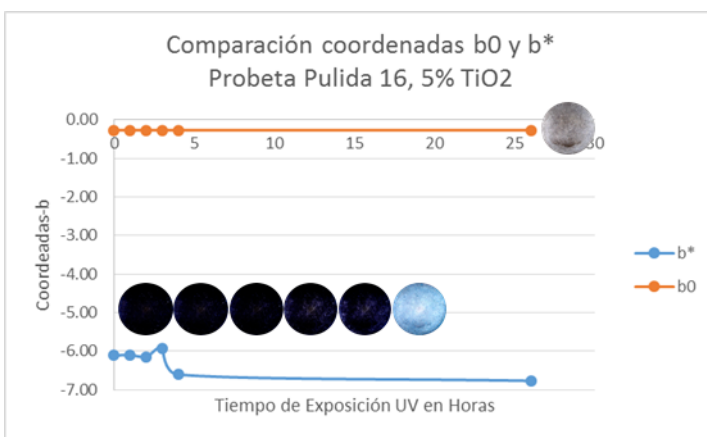
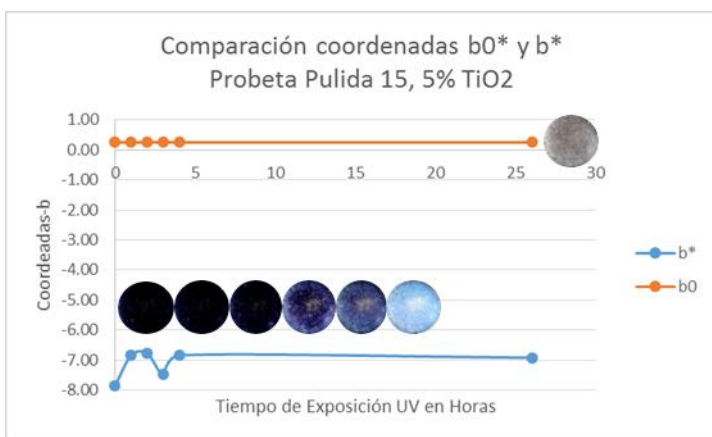
Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de concreto hechas a base de cemento gris sin adición de dióxido de titanio, con humedad del 3.5%.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 13 sin TiO2			Probeta Pulida 14 sin TiO2			Probeta Rugosa 13 sin TiO2			Probeta Rugosa 14 sin TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	49.82	1.89	-8.03	47.83	1.92	-8.09	52.21	1.18	-2.04	55.87	1.71	-1.22
1	53.29	1.50	-8.06	57.96	1.46	-7.94	53.78	1.18	-2.03	64.09	1.34	-6.63
2	56.52	0.31	-8.99	56.45	-0.14	-7.94	56.56	1.89	-6.00	63.20	0.87	-7.41
3	57.08	-0.83	-8.16	61.35	-0.71	-7.41	58.28	1.03	-6.87	62.49	-0.72	-7.38
4	60.28	-2.07	-7.90	60.78	-1.61	-7.14	61.39	-0.59	-6.77	63.25	-0.72	-7.37
26	64.93	-1.82	-6.53	64.49	-0.53	-4.91	65.62	-0.53	-4.89	66.33	0.81	-3.24
INICIAL	59.51	0.56	-0.40	62.19	0.56	-0.40	64.82	0.36	0.12	66.06	0.91	-0.27



Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	Sin % TiO2			
% Degradación	Pulida 13	Pulida 14	Rugosa 13	Rugosa 14
R-4	1.61	11.82	-231.16	-505.18
R-26	18.68	39.33	-139.47	-165.93

Reporte fotográfico de degradación de azul de metileno en probetas de concreto hechas a base de cemento gris adicionadas con 5% de dióxido de titanio, con humedad del 5.8%.								
Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
Tiempo de Exposición	Pulida 15		Pulida 16		Rugosa 15		Rugosa 16	
	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

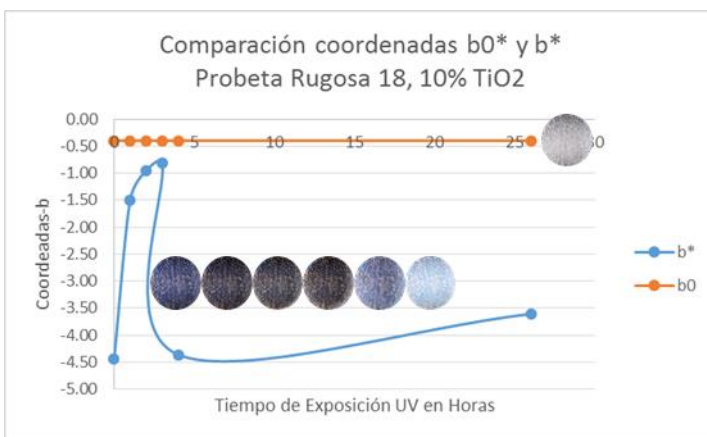
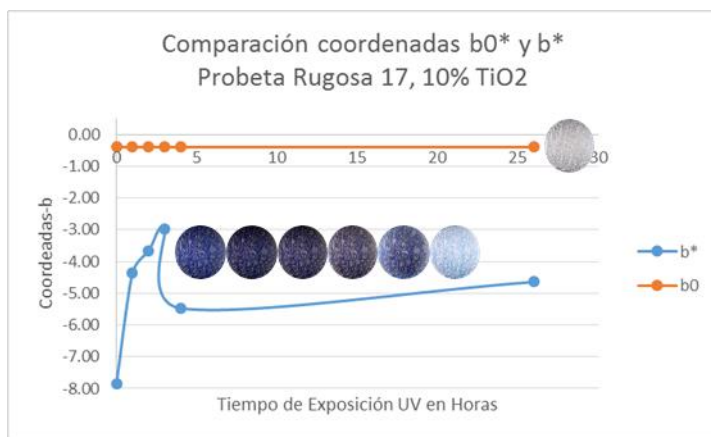
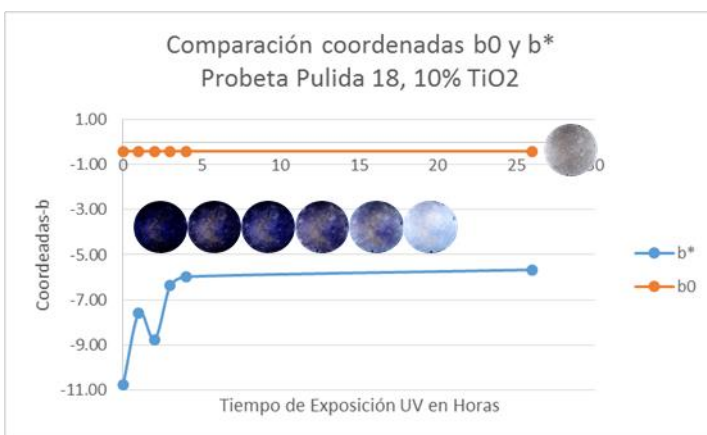
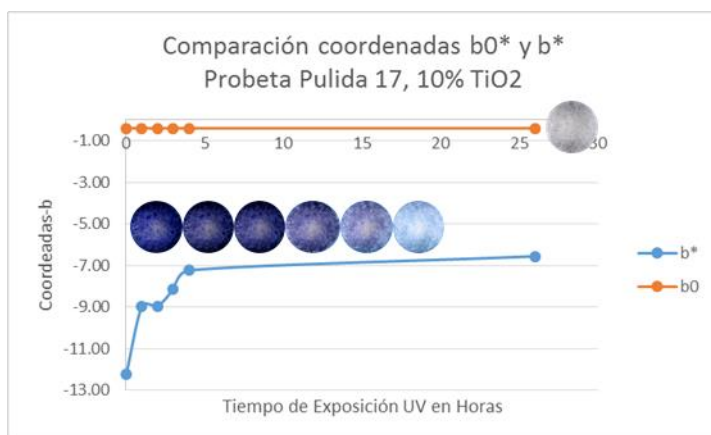
Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de mortero hechas a base de cemento gris adicionadas con 5% de dióxido de titanio, con humedad del 5.8%.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 15 5% TiO2			Probeta Pulida 16 5% TiO2			Probeta Rugosa 15 5% TiO2			Probeta Rugosa 16 5% TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	38.79	3.52	-7.85	40.34	2.80	-6.11	46.87	3.01	-7.73	48.07	3.00	-7.69
1	39.05	2.67	-6.85	40.75	2.79	-6.10	48.16	3.36	-7.56	45.29	3.27	-8.33
2	41.52	2.64	-6.78	39.10	2.82	-6.14	46.99	3.60	-8.14	46.82	2.88	-8.41
3	51.34	3.31	-7.47	42.48	3.14	-5.92	50.50	3.18	-8.17	49.34	3.43	-8.74
4	54.09	1.41	-6.84	42.84	2.99	-6.60	56.76	3.10	-7.99	51.31	3.09	-6.93
26	65.41	-1.27	-6.92	64.78	-2.50	-6.77	64.76	-0.72	-7.33	64.68	-2.50	-10.31
INICIAL	59.95	0.73	0.26	60.75	0.92	-0.27	64.09	0.55	-0.40	64.47	0.55	-0.40



Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b^* .				
Tipo de Probeta	5% TiO2			
% Degradación	Pulida 15	Pulida 16	Rugosa 15	Rugosa 16
R-4	12.86	-8.10	-3.37	9.91
R-26	11.85	-10.76	5.12	-34.05

Reporte fotográfico de degradación de azul de metileno en probetas de concreto hechas a base de cemento gris adicionadas con 10% de dióxido de titanio, con humedad del 5.9%.								
Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
Tiempo de Exposición	Pulida 17		Pulida 18		Rugosa 17		Rugosa 18	
	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

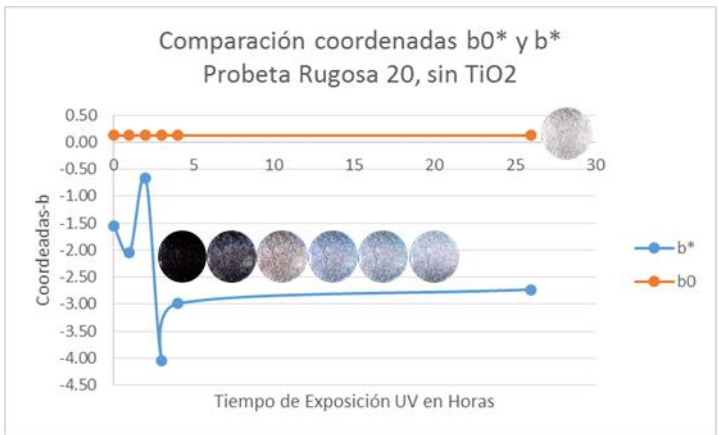
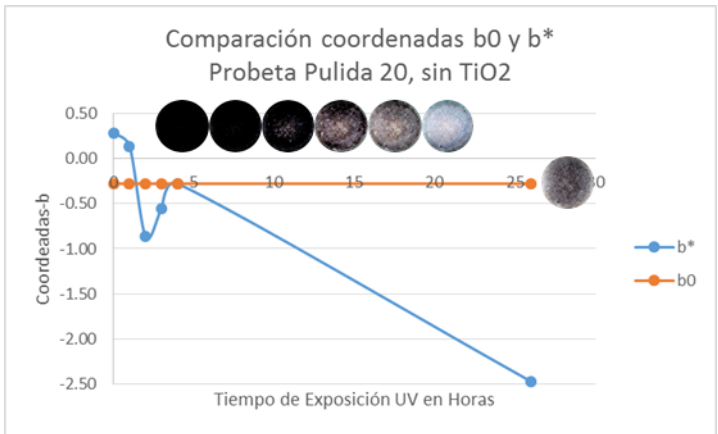
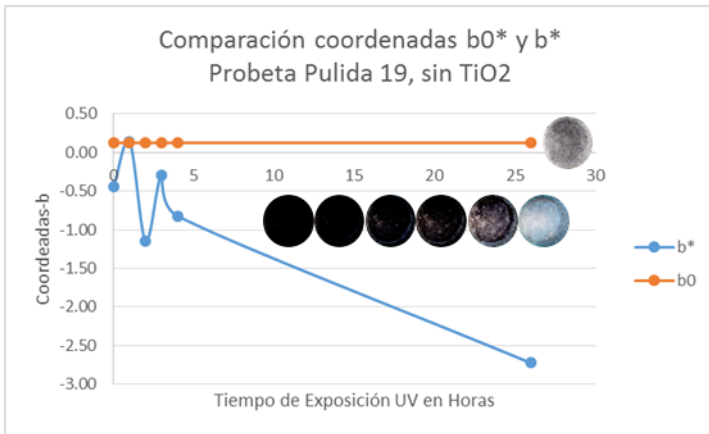
Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de mortero hechas a base de cemento gris adicionadas con 10% de dióxido de titanio, con humedad del 5.9%.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 17 10% TiO2			Probeta Pulida 18 10% TiO2			Probeta Rugosa 17 10% TiO2			Probeta Rugosa 18 10% TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	49.38	4.11	-12.25	42.91	3.90	-10.76	52.27	2.22	-7.84	54.52	1.27	-4.44
1	49.97	2.70	-8.98	47.36	3.37	-7.58	50.27	1.66	-4.37	52.58	0.98	-1.50
2	50.76	2.69	-8.96	48.54	3.44	-8.77	51.51	1.81	-3.68	54.12	0.77	-0.95
3	55.52	2.76	-8.15	53.24	2.85	-6.35	54.32	1.95	-2.97	53.81	1.14	-0.82
4	59.93	1.58	-7.24	57.72	1.88	-5.98	56.53	1.68	-5.47	59.55	1.24	-4.36
26	65.63	-0.25	-6.56	66.59	0.57	-5.67	66.15	0.16	-4.64	66.47	-0.24	-3.61
INICIAL	64.09	0.55	-0.40	61.43	0.56	-0.40	64.84	0.55	-0.40	64.09	0.55	-0.40



Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	10% TiO2			
% Degradación	Pulida 17	Pulida 18	Rugosa 17	Rugosa 18
R-4	40.91	44.44	30.18	1.68
R-26	46.41	47.33	40.74	18.70

Reporte fotográfico de degradación de azul de metileno en probetas de concreto hechas a base de cemento gris sin adición de dióxido de titanio, en estado saturado superficialmente seco.								
Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
Tiempo de Exposición	Pulida 19		Pulida 20		Rugosa 19		Rugosa 20	
	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de mortero hechas a base de cemento gris sin adición de dióxido de titanio, muestra sss.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 19 sin TiO2			Probeta Pulida 20 sin TiO2			Probeta Rugosa 19 sin TiO2			Probeta Rugosa 20 sin TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	33.30	0.62	-0.45	34.21	0.82	0.29	45.40	1.01	-1.54	43.78	1.01	-1.55
1	36.24	0.40	0.14	36.66	0.40	0.14	47.50	1.38	-1.39	52.61	1.18	-2.04
2	39.55	0.42	-1.15	40.56	1.21	-0.86	51.37	0.78	-0.96	62.76	1.47	-0.67
3	42.58	0.99	-0.29	52.80	1.90	-0.55	53.36	0.97	-1.49	63.18	0.32	-4.04
4	52.63	1.15	-0.82	57.67	0.93	-0.28	57.26	0.96	-1.47	63.88	-0.09	-2.99
26	62.56	-1.00	-2.73	63.47	-0.29	-2.47	65.80	0.11	-3.49	65.17	0.62	-2.73
INICIAL	60.25	0.37	0.13	56.90	0.94	-0.28	67.07	0.36	0.12	66.70	0.36	0.12

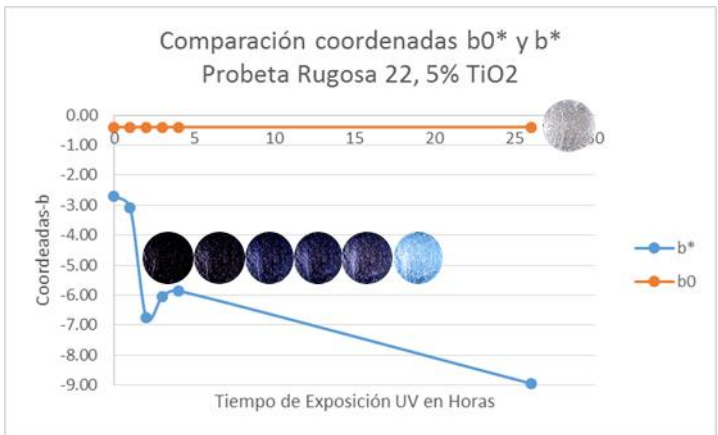
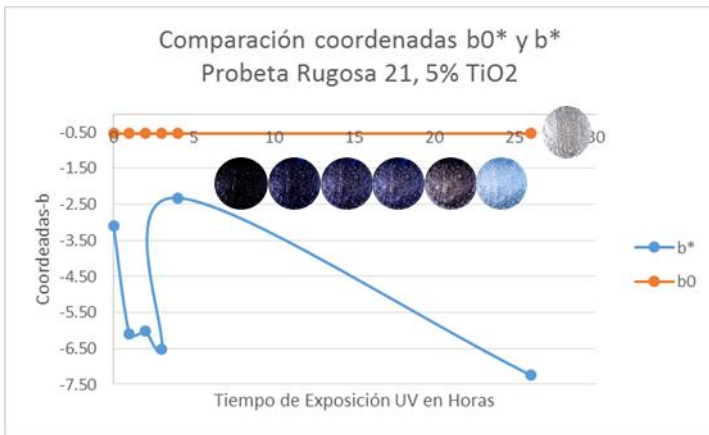
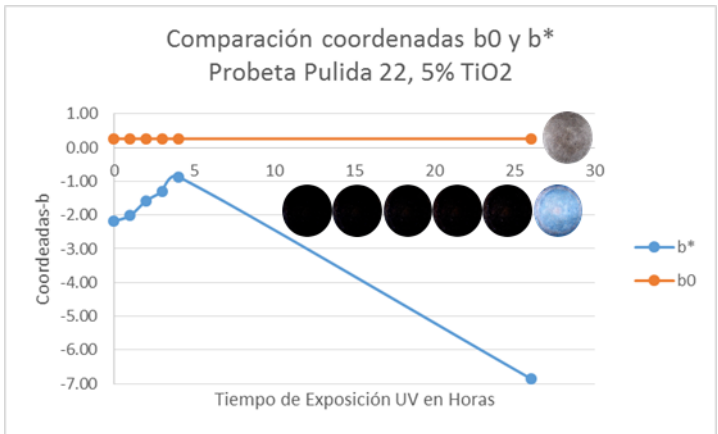
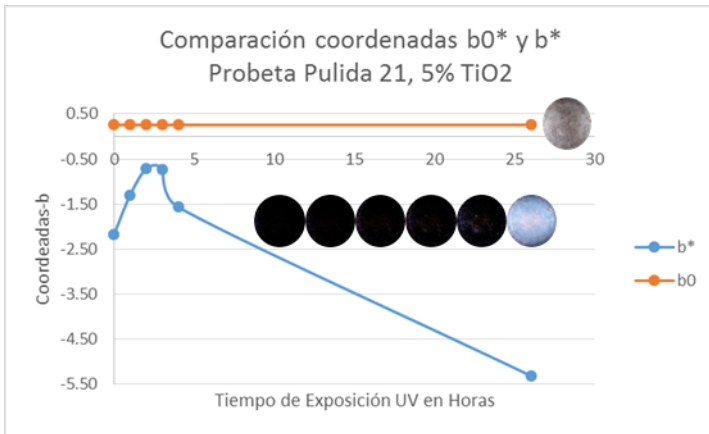


Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	Sin TiO2			
% Degradación	Pulida 19	Pulida 20	Rugosa 19	Rugosa 20
R-4	-83.74	196.27	4.25	-92.88
R-26	-508.85	962.93	-126.65	-76.07

Reporte fotográfico de degradación de azul de metileno en probetas de concreto hechas a base de cemento gris adicionadas con 5% de dióxido de titanio, en estado saturado superficialmente seco.

Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
	Pulida 21		Pulida 22		Rugosa 21		Rugosa 22	
Tiempo de Exposición	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de mortero hechas a base de cemento gris adicionadas con 5% de dióxido de titanio, muestra sss.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 21 5% TiO2			Probeta Pulida 22 5% TiO2			Probeta Rugosa 21 5% TiO2			Probeta Rugosa 22 5% TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	37.20	1.26	-2.17	35.94	1.27	-2.19	43.14	2.04	-3.10	40.56	1.46	-2.71
1	38.60	1.83	-1.30	38.96	1.64	-2.01	46.77	2.34	-6.08	44.36	2.03	-3.09
2	40.23	1.60	-0.72	39.67	1.03	-1.58	49.97	2.31	-6.01	47.52	2.19	-6.75
3	39.82	1.61	-0.72	38.60	1.83	-1.30	51.19	2.51	-6.53	48.38	2.32	-6.05
4	40.91	1.02	-1.57	40.14	1.21	-0.86	52.80	2.13	-2.31	51.24	2.66	-5.85
26	63.84	0.03	-5.32	63.22	-0.93	-6.85	63.70	-0.38	-7.24	64.83	-1.96	-8.94
INICIAL	59.57	0.73	0.26	58.80	0.74	0.26	63.63	0.19	-0.53	64.09	0.55	-0.40

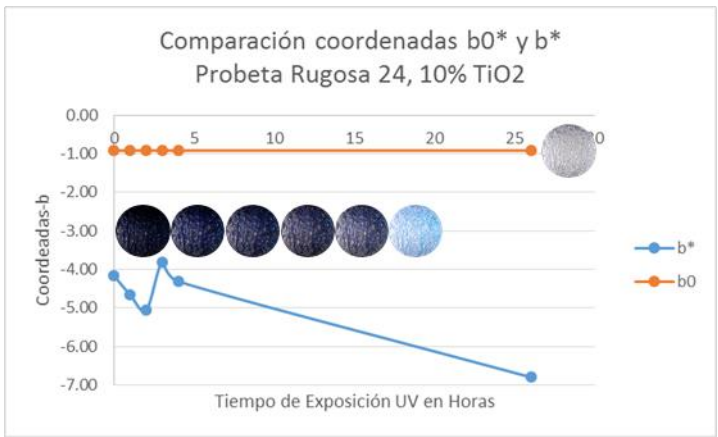
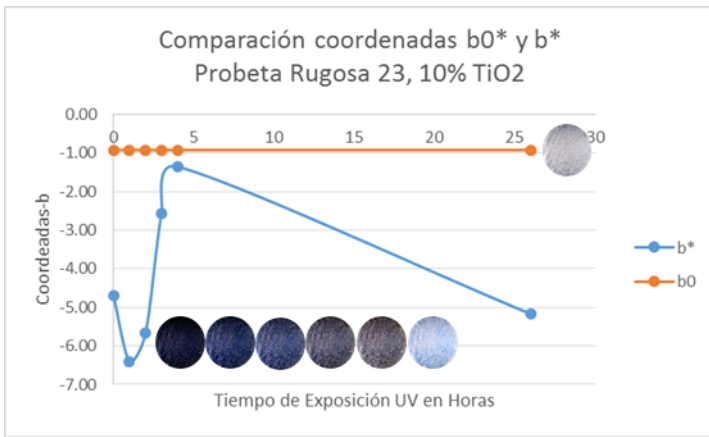
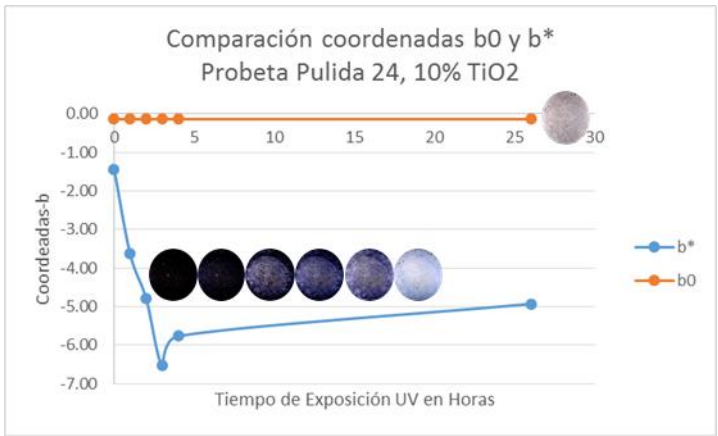
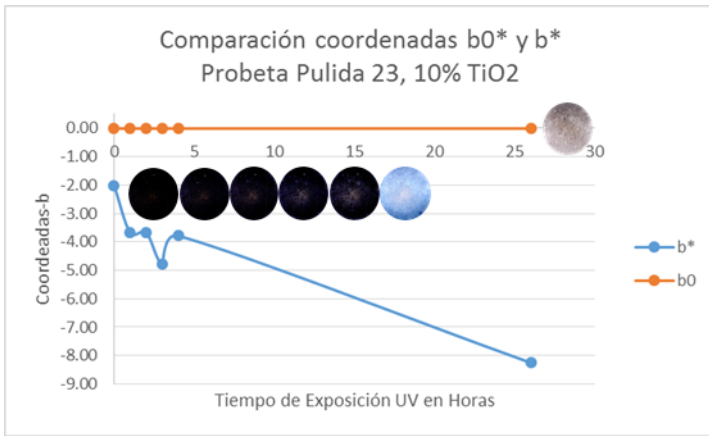


Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	5% TiO2			
% Degradación	Pulida 21	Pulida 22	Rugosa 21	Rugosa 22
R-4	27.77	60.47	25.41	-116.10
R-26	-144.78	-213.40	-133.39	-230.28

Reporte fotográfico de degradación de azul de metileno en probetas de concreto hechas a base de cemento gris adicionadas con 10% de dióxido de titanio, en estado saturado superficialmente seco.

Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
	Pulida 23		Pulida 24		Rugosa 23		Rugosa 24	
Tiempo de Exposición	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de mortero hechas a base de cemento gris adicionadas con 10% de dióxido de titanio, muestra sss.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 23 10% TiO2			Probeta Pulida 24 10% TiO2			Probeta Rugosa 23 10% TiO2			Probeta Rugosa 24 10% TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	38.96	1.64	-2.01	39.76	1.42	-1.44	46.51	0.94	-4.70	45.27	0.73	-4.17
1	41.95	2.27	-3.68	43.15	5.76	-3.64	50.12	1.22	-6.40	48.91	0.93	-4.66
2	43.17	2.25	-3.66	49.59	2.25	-4.80	52.93	1.34	-5.67	49.82	1.51	-5.06
3	43.24	2.69	-4.78	50.79	2.52	-6.54	53.81	1.38	-2.57	51.43	1.44	-3.81
4	43.90	1.87	-3.79	55.56	2.61	-5.76	55.79	1.34	-1.35	54.21	1.63	-4.31
26	64.52	0.05	-8.25	65.21	1.07	-4.93	65.43	0.37	-5.17	65.86	-0.93	-6.80
INICIAL	62.44	1.65	-0.01	63.49	1.28	-0.14	64.49	0.74	-0.92	64.49	0.74	-0.92



Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	10% TiO2			
% Degradación	Pulida 23	Pulida 24	Rugosa 23	Rugosa 24
R-4	-88.09	-301.25	71.28	-3.40
R-26	-309.83	-243.06	-9.98	-62.99

7.3.3 Resultados obtenidos e interpretación de resultados de autolimpieza de azul de metileno

Con el propósito de monitorizar la fotodegradación de colorantes de azul de metileno sobre las probetas se calculan los factores R4 y R26, como lo indica la norma UNI: 11259:2008, en el cual la probeta es considerada fotocatalítica si cumple los criterios de las ecuaciones 2 y 3.

$$R4 = \left(\frac{a * (0h) - a * (4h)}{a * (0h)} * 100 \right) > 20\% \quad \text{ecs. (2)}$$

$$R26 = \left(\frac{a * (0h) - a * (26h)}{a * (0h)} * 100 \right) > 50\% \quad \text{ecs. (3)}$$

Porcentaje de degradación coordenadas de espacio de color b*												
Probetas de mortero hechas a base de cemento gris.												
Tipo de Probeta	Humedad 9.2%				Humedad 8.6%				Humedad 9.9%			
	Sin TiO2				5% TiO2				10% TiO2			
% Degradación	Pulida 1	Pulida 2	Rugosa 1	Rugosa 2	Pulida 3	Pulida 4	Rugosa 3	Rugosa 4	Pulida 5	Pulida 6	Rugosa 5	Rugosa 6
R-4	22.34	-78.26	-166.12	-470.25	-13.86	68.04	60.73	-298.07	-27.43	-16.40	-8.82	-270.15
R-26	-41.61	6.87	-244.08	-474.16	34.35	73.99	83.12	5.59	-8.62	89.85	125.05	-101.31
Probetas de mortero hechas a base de cemento gris, muestras saturadas superficialmente secas.												
Tipo de Probeta	Sin TiO2				5% TiO2				10% TiO2			
	% Degradación	Pulida 7	Pulida 8	Rugosa 7	Rugosa 8	Pulida 9	Pulida 10	Rugosa 9	Rugosa 10	Pulida 11	Pulida 12	Rugosa 11
R-4	3.46	58.28	-27.31	162.88	73.20	77.07	-11.53	46.51	91.93	81.72	-23.86	99.33
R-26	4.53	32.38	192.68	47.00	-81.23	77.51	-4.38	-0.13	-65.04	47.41	-398.83	-572.54
Probetas de concreto hechas a base de cemento gris.												
Tipo de Probeta	Humedad 3.5%				Humedad 5.8%				Humedad 5.9%			
	Sin TiO2				5% TiO2				10% TiO2			
% Degradación	Pulida 13	Pulida 14	Rugosa 13	Rugosa 14	Pulida 15	Pulida 16	Rugosa 15	Rugosa 16	Pulida 17	Pulida 18	Rugosa 17	Rugosa 18
R-4	1.61	11.82	-231.16	-505.18	12.86	-8.10	-3.37	9.91	40.91	44.44	30.18	1.68
R-26	18.68	39.33	-139.47	-165.93	11.85	-10.76	5.12	-34.05	46.41	47.33	40.74	18.70
Probetas de concreto hechas a base de cemento gris, muestras saturadas superficialmente secas.												
Tipo de Probeta	Sin TiO2				5% TiO2				10% TiO2			
	% Degradación	Pulida 19	Pulida 20	Rugosa 19	Rugosa 20	Pulida 21	Pulida 22	Rugosa 21	Rugosa 22	Pulida 23	Pulida 24	Rugosa 23
R-4	-83.74	196.27	4.25	-92.88	27.77	60.47	25.41	-116.10	-88.09	-301.25	71.28	-3.40
R-26	-508.85	962.93	-126.65	-76.07	-144.78	-213.40	-133.39	-230.28	-309.83	-243.06	-9.98	-62.99

TABLA 7.3: FACTORES R4 Y R26 EN PROBETAS DE MORTERO Y DE CONCRETO.

Al analizar los datos de la coordenada de color b* se pudo observar que estos valores son muy variables y no son lineales como se esperaban, provocando que al momento de obtener los factores de degradación R4 y R26 en ocasiones los valores sean negativos, debido a que al momento de realizar la medición de color con la aplicación GIMP, la coordenada evaluada ya seas R4 o R26 es mayor a la coordenada de partida R0, lo que nos provoca los valores negativos, indicando que en vez de haber recuperación de color, este aumenta, lo cual no es congruente comparando visualmente las probetas.

E la tabla 7.3 se puede observar que son pocas las probetas que cumplen con los factores R4 y R26 de la norma UNI: 11259:2008, siendo únicamente las probetas pulida 4, pulida 10 y rugosa 3 pertenecientes a las probetas adicionadas con 5% de TiO₂ y la probeta pulida 20 esta última perteneciente a una probeta sin adición de TiO₂, sin embargo los factores de esta probeta son muy elevados sobrepasando por mucho lo esperado, siendo imposible este comportamiento debido a que el concreto por sí solo no tiene propiedades de autolimpieza.

Derivado de los factores obtenidos y no siendo lo esperado en el procedimiento experimental, se decidió evaluar las probetas visualmente, por lo que las imágenes obtenidas de cada probeta fueron trabajadas en el programa GIMP, aumentándoles el contrastes 90% y disminuyéndoles el brillo 25%, permitiéndonos ver el color que predominaba en la fotografía. Debido a esto en cada tabla del reporte fotográfico se le añadió una columna con la foto modificada por el programa GIMP, para hacer la comparativa de la foto original y la foto modificada; a continuación se presentan los reportes fotográfico resumido de las probetas ensayadas, con el fin de facilitarse la inspección visual de las mismas.

Reporte visual probetas de mortero													
Características		No. de Probeta	Tiempo de Exposición				Características		No. de Probeta	Tiempo de Exposición			
			0 hrs	4 hrs	26 hrs	Inicial				0 hrs	4 hrs	26 hrs	Inicial
Sin TiO ₂	Humedad 9.2%	Pulida 1					Sin TiO ₂	SSS	Pulida 7				
		Pulida 2							Pulida 8				
		Rugosa 1							Rugosa 7				
		Rugosa 2							Rugosa 8				
5% TiO ₂	Humedad 8.6%	Pulida 3					5% TiO ₂	SSS	Pulida 9				
		Pulida 4							Pulida 10				
		Rugosa 3							Rugosa 9				
		Rugosa 4							Rugosa 10				
10% TiO ₂	Humedad 9.9%	Pulida 5					10% TiO ₂	SSS	Pulida 11				
		Pulida 6							Pulida 12				
		Rugosa 5							Rugosa 11				
		Rugosa 6							Rugosa 12				

TABLA 7.4: REPORTE FOTOGRÁFICO RESUMIDO DE PROBETAS DE MORTERO.

Reporte visual probetas de concreto													
Características		No. de Probeta	Tiempo de Exposición				Características		No. de Probeta	Tiempo de Exposición			
			0 hrs	4 hrs	26 hrs	Inicial				0 hrs	4 hrs	26 hrs	Inicial
Sin TiO ₂	Humedad 3.5%	Pulida 13					Sin TiO ₂	SSS	Pulida 19				
		Pulida 14							Pulida 20				
		Rugosa 13							Rugosa 19				
		Rugosa 14							Rugosa 20				
5% TiO ₂	Humedad 5.8%	Pulida 15					5% TiO ₂	SSS	Pulida 21				
		Pulida 16							Pulida 22				
		Rugosa 15							Rugosa 21				
		Rugosa 16							Rugosa 22				
10% TiO ₂	Humedad 5.9%	Pulida 17					10% TiO ₂	SSS	Pulida 23				
		Pulida 18							Pulida 24				
		Rugosa 17							Rugosa 23				
		Rugosa 18							Rugosa 24				

TABLA 7.5: REPORTE FOTOGRÁFICO RESUMIDO DE PROBETAS DE CONCRETO.

Se puede observar que tanto las probetas de mortero como las de concreto presentan degradación de azul de metileno en sus tres condiciones de ensayo, sin embargo esta depende de la cantidad de nanopartículas de dióxido de titanio agregada a la probeta; en relación a las probetas que carecían de este compuesto, la degradación de color se debe a la interacción directa entre el colorante y la irradiación de luz UV-A, ya que por sí misma la irradiación UV-A degrada el color sin embargo no es lo suficiente para considerarla fotocatalítica.

En lo que corresponde a las probetas de mortero ensayadas con humedad adsorbida del medio ambiente y adicionadas con 5% y 10% de nanopartículas de TiO₂, se puede observar claramente que existe una degradación considerable de color azul llegando a desaparecer casi por completo, habiendo una mayor degradación en las probetas adicionadas con 10% de nanopartículas de TiO₂, a su vez se observa mayor degradación de color en las probetas pulidas que en las probetas rugosas, esto puede ser debido que en las superficies pulidas la luz UV-A penetra de lleno a las probetas, en cambio las probetas rugosas por si mismas características de irregularidad la luz no penetra directamente en toda la sección.

Con respecto a las probetas de mortero ensayadas en estado SSS, por su misma condición de saturación al momento de sumergirlas en el colorante de azul de metileno, éstas no absorbían una buena cantidad de color, siendo casi indetectable el colorante azul en las probetas, por lo que se secaron nuevamente las probetas y se sumergieron de nuevo en el azul de metileno, para nuevamente ser puesta en estado saturado superficialmente seco. Al haber manchado en dos ocasiones las probetas con azul de metileno, estas absorbieron colorante de una manera menos uniforme; observándose que la absorción de color fue menos en las probetas sin adición de nanopartículas de TiO_2 , posteriormente están las probetas de adicionadas con 10% de TiO_2 que absorbieron una cantidad un poco mayor y por último las probetas adicionadas con 5% de TiO_2 que absorbieron la mayor cantidad de colorante, por lo que al momento de evaluar las probetas visualmente a las 26 hrs estas se ven similares, sin embargo conforme a la cantidad de color absorbida se puede ver que nuevamente las probetas adicionadas con 5% y 10% de nanopartículas de TiO_2 , presentan una degradación considerable de color azul llegando a desaparecer casi por completo en las probetas adicionadas con de 10% de TiO_2 debido a que absorbieron menos color de azul de metileno, observando nuevamente mayor degradación de color en las probetas pulidas que en las probetas rugosas.

En lo que corresponde a las probetas de concreto, la intensidad de azul de metileno es mayor que en las de mortero, sin embargo se observa visualmente el mismo comportamiento que las probetas de mortero, en donde se tiene degradación de color mayor en las probetas adicionadas con 5% y 10% de TiO_2 , siendo mayor en esta última, observando una mayor degradación de azul de metileno en las probetas pulidas que en las rugosas.

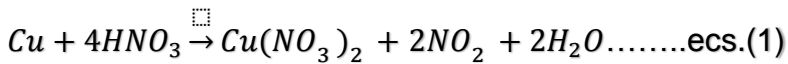
7.4 Pruebas de degradación de dióxido de nitrógeno NO_2

Existen diferentes normas para la medición de la degradación de los dióxidos de nitrógeno (NO_x), como es el caso de la norma ISO 22197-1:2007; la cual propone un método para la determinación de la actividad descontaminante de materiales que contienen un fotocatalizador. El ensayo consiste en la exposición continua de una muestra a un gas contaminante bajo radiación UV y la medición de las concentraciones de dicho gas antes y después de pasar por la muestra. Sin embargo en este proyecto experimental se realizará el procedimiento como en la norma UNI 11259: 2008, pero en vez de manchar la superficie de la probeta con azul de metileno o con rojo de metilo como lo indica la norma, esta se manchó con gas de dióxido de nitrógeno NO_2 , producido con una reacción redox entre el cobre (Cu) y ácido nítrico (HNO_3); escogiéndose el NO_2 como gas contaminante debido a que este es uno de los principales gases contaminantes generados en la ZMVM, por el uso de fuentes móviles como es el caso de los transporte público y privado, emitiendo en promedio 5.13 gramos de NO_x por kilómetro por vehículo; siendo 2.15 g/km de NO_2 y 2.98 g/km de NO.

7.4.1 Procedimiento experimental de autolimpieza de dióxido de nitrógeno NO_2

Para obtener el contaminante utilizado en las probetas fue por medio de la combinación de ácido nítrico con cobre, como se muestra en la ecuación química balanceada (1), la cual nos indica que por cada mol de cobre (Cu) se requieren 4 moles de ácido nítrico (HNO_3), que al reaccionar el cobre se oxida

produciendo como subproductos un mole de nitrato de cobre ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$), 2 moles de dióxido de nitrógeno y 2 moles de agua.



La velocidad de esta reacción depende del área superficial del cobre; por lo que el cable de cobre fue cortado en secciones pequeñas con el fin de que reaccionará más rápidamente; al reaccionar el cobre con el ácido nítrico, la solución primero se vuelve verde, luego marrón verdoso y finalmente azul una vez que se diluye con el agua

La cantidad de dióxido de nitrógeno generada para las probetas de mortero son de 10.76 gramos y 17.21 gramos para las probetas de concreto; lo que corresponden a 5 km y 8 km promedio emitidos por un vehículo en la ZMVM.

El procedimiento realizado para el ensayo de autolimpieza de dióxido de nitrógeno se describe a continuación:

1. Se introdujeron las probetas en una caja de plástico, para posteriormente ser expuestas a dióxido de nitrógeno.



Fig. 7.21 Probetas en caja de plástico.

2. Se mezcló el ácido nítrico con el cobre, para generar el dióxido de nitrógeno.



Fig. 7.22 Probetas siendo expuestas a dióxido de nitrógeno.

3. Posteriormente las probetas se dejaron secar a temperatura ambiente durante treinta minutos.



Fig. 7.23 Probetas dejándose secar a temperatura ambiente.

4. Una vez finalizado el paso 3 se repitieron los pasos 5, 6, 7 y 8 del apartado 7.3.1.

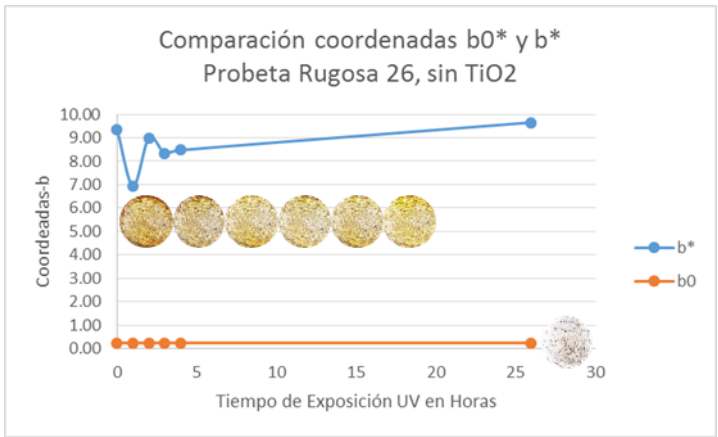
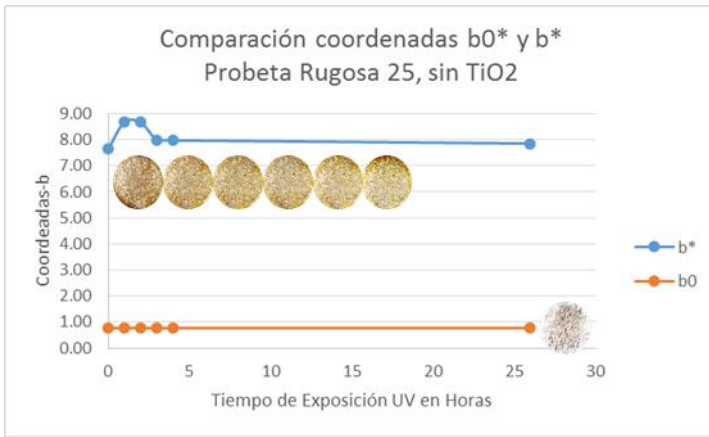
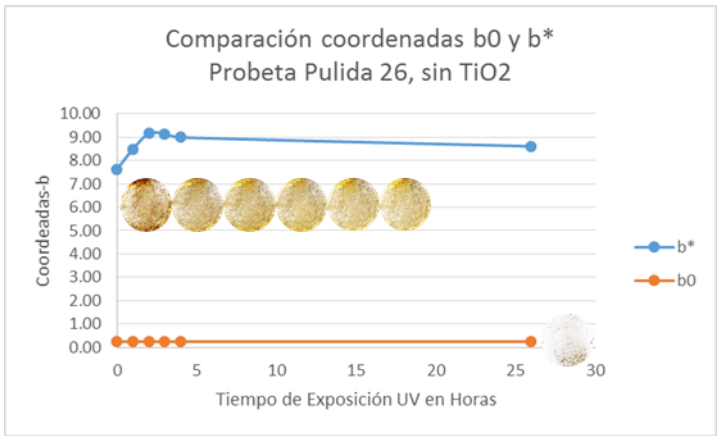
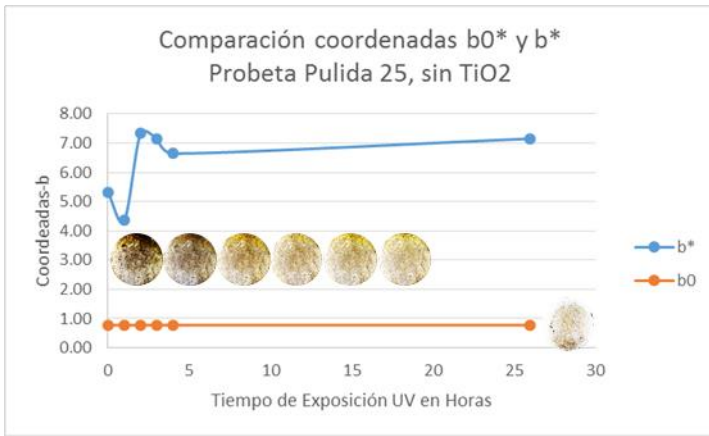
7.4.2 Resultados de autolimpieza superficial de dióxido de nitrógeno

Los ensayos de autolimpieza se llevaron a cabo en probetas a base de cemento portland y con dos tipos de acabados superficiales, uno rugoso y el otro pulido; a su vez se han realizado las evaluaciones en dos tipos de estados de las probetas, uno que corresponde a temperatura ambiente con la humedad absorbida del mismo y la otra en estado saturado superficialmente seco. Las mediciones de color en las probetas se realizaron por medio del reporte fotográfico donde se evaluaron por medio del programa GIMP en el cual se obtuvieron las coordenadas RGB que posteriormente se transformaban a coordenadas Lab; cabe mencionar que la coordenada evaluada en el presente trabajo es la (b^*) debido a que esta coordenada mide el color amarillo en sus valores positivos, y en el caso de este trabajo de investigación al momento de exponer las probetas al dióxido de nitrógeno estas quedaban manchadas en su superficie de color amarillo.

Reporte fotográfico de degradación de NO ₂ en probetas de mortero hechas a base de cemento gris sin adición de dióxido de titanio, con humedad del 3.6%.								
Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
Tiempo de Exposición	Pulida 25		Pulida 26		Rugosa 25		Rugosa 26	
	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de mortero hechas a base de cemento gris sin adición de dióxido de titanio, con humedad del 3.6%.

Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 25 sin TiO2			Probeta Pulida 26 sin TiO2			Probeta Rugosa 25 sin TiO2			Probeta Rugosa 26 sin TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	59.50	-0.19	5.31	63.37	1.55	7.63	62.61	1.56	7.64	63.38	1.44	9.34
1	60.78	0.54	4.36	65.12	0.82	8.49	63.70	1.21	8.67	64.06	1.34	6.95
2	64.33	0.78	7.33	65.19	1.04	9.15	63.70	1.21	8.67	65.85	0.65	9.00
3	66.13	0.40	7.15	65.56	1.03	9.14	64.02	1.00	8.00	66.17	0.44	8.33
4	65.40	0.57	6.65	66.23	0.65	8.99	64.77	0.99	7.98	65.88	0.82	8.47
26	66.13	0.40	7.15	65.96	1.20	8.61	64.31	0.61	7.86	65.92	0.87	9.65
INICIAL	63.74	0.53	0.78	64.90	0.72	0.25	64.12	0.53	0.77	65.28	0.72	0.25



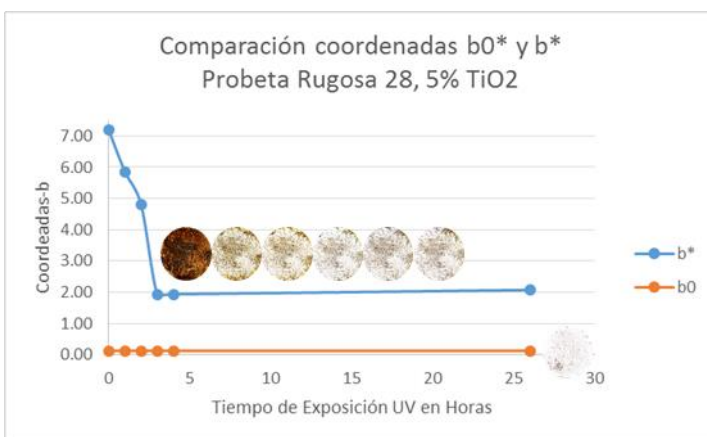
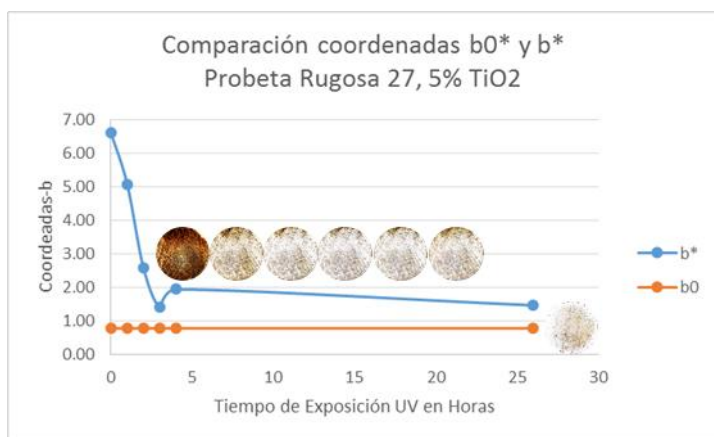
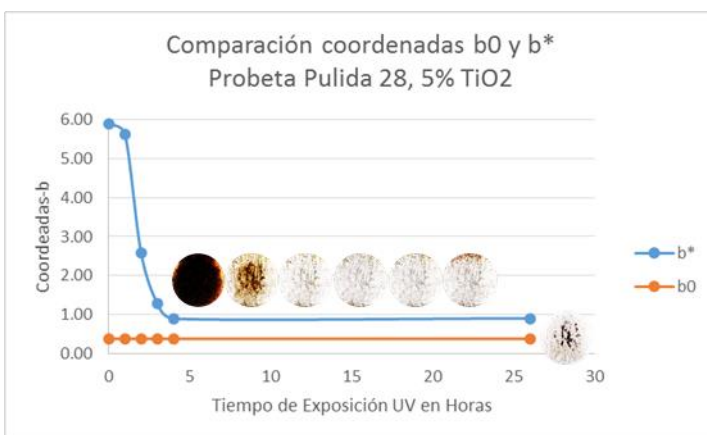
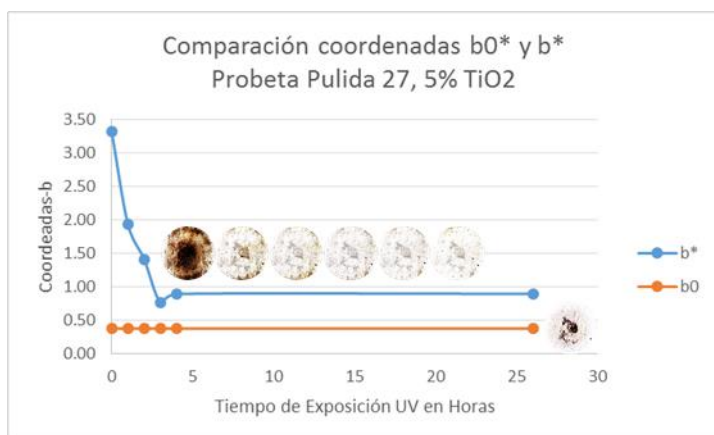
Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	Sin TiO2			
% Degradación	Pulida 25	Pulida 26	Rugosa 25	Rugosa 26
R-4	-25.28	-17.85	-4.37	9.32
R-26	-34.84	-12.87	-2.76	-3.32

Reporte fotográfico de degradación de NO₂ en probetas de mortero hechas a base de cemento gris adicionadas con 5% de dióxido de titanio, con humedad del 4.6%.

Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
	Pulida 27		Pulida 28		Rugosa 27		Rugosa 28	
Tiempo de Exposición	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de mortero hechas a base de cemento gris adicionadas con 5% de dióxido de titanio, con humedad del 4.6%.

Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 27 5% TiO2			Probeta Pulida 28 5% TiO2			Probeta Rugosa 27 5% TiO2			Probeta Rugosa 28 5% TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	58.15	0.92	3.33	45.90	2.44	5.90	55.66	1.58	6.61	54.07	1.42	7.19
1	65.28	0.52	1.94	63.57	0.93	5.63	65.48	1.10	5.08	65.26	0.00	5.86
2	66.43	0.71	1.42	67.24	-0.94	2.59	66.84	0.70	2.58	66.07	0.35	4.80
3	66.75	0.53	0.77	66.73	0.34	1.29	66.81	0.70	1.41	66.78	0.52	1.93
4	67.21	0.89	0.89	66.83	0.89	0.90	66.78	0.52	1.93	66.41	0.52	1.94
26	66.46	0.89	0.90	64.58	0.90	0.90	64.61	-2.57	1.46	65.36	0.89	2.07
INICIAL	65.36	1.08	0.38	64.60	1.09	0.38	64.87	0.53	0.77	67.07	0.36	0.12

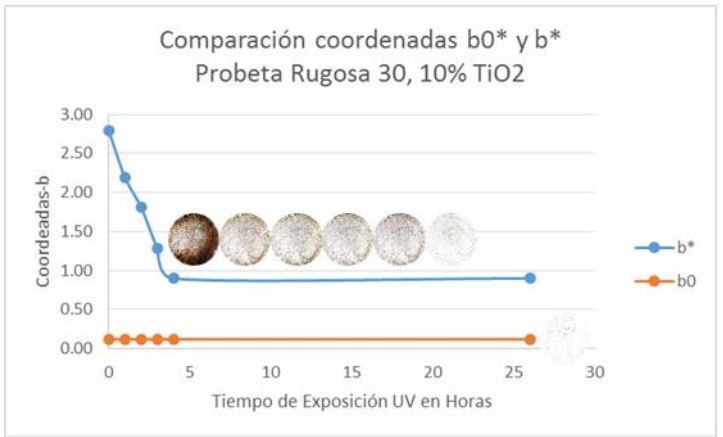
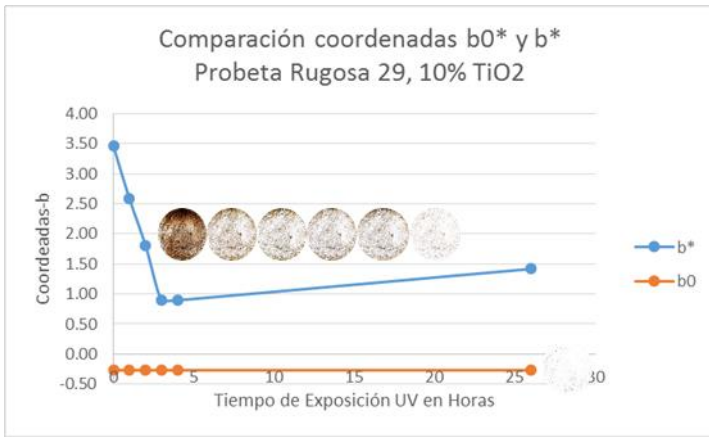
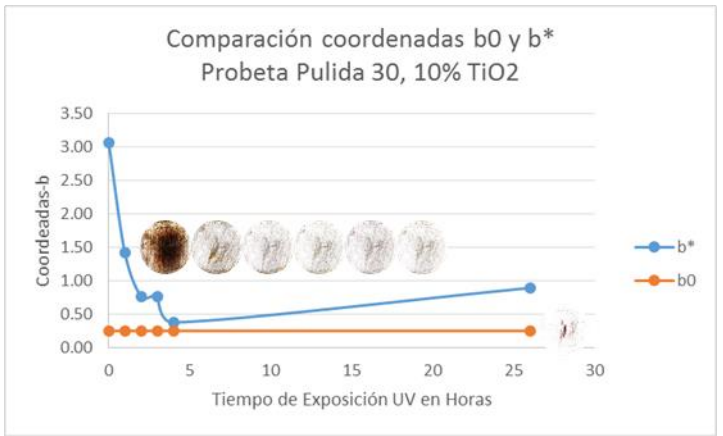
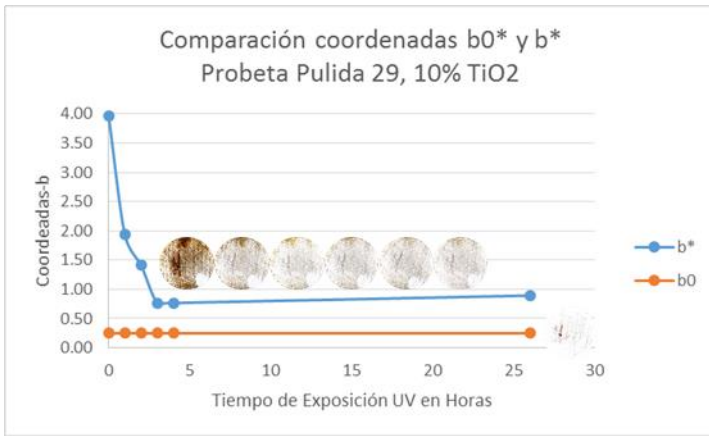


Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	5% TiO2			
% Degradación	Pulida 27	Pulida 28	Rugosa 27	Rugosa 28
R-4	73.09	84.80	70.74	73.08
R-26	73.03	84.69	77.95	71.19

Reporte fotográfico de degradación de NO₂ en probetas de mortero hechas a base de cemento gris adicionadas con 10% de dióxido de titanio, con humedad del 4.0%.

Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
	Pulida 29		Pulida 30		Rugosa 29		Rugosa 30	
	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

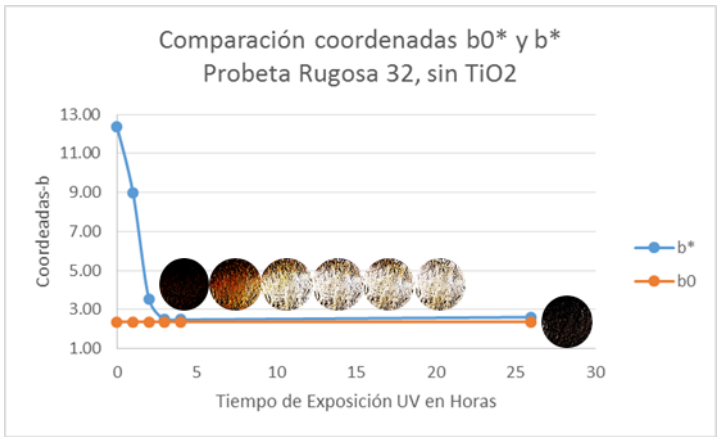
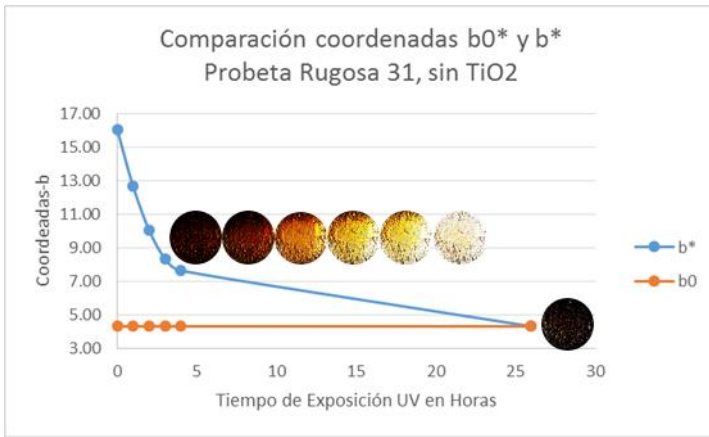
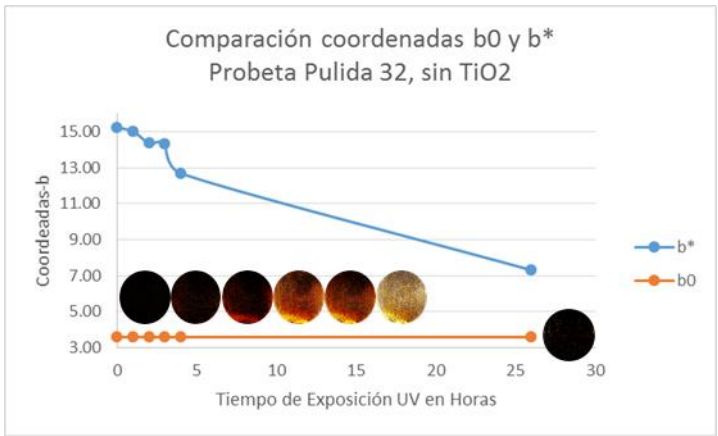
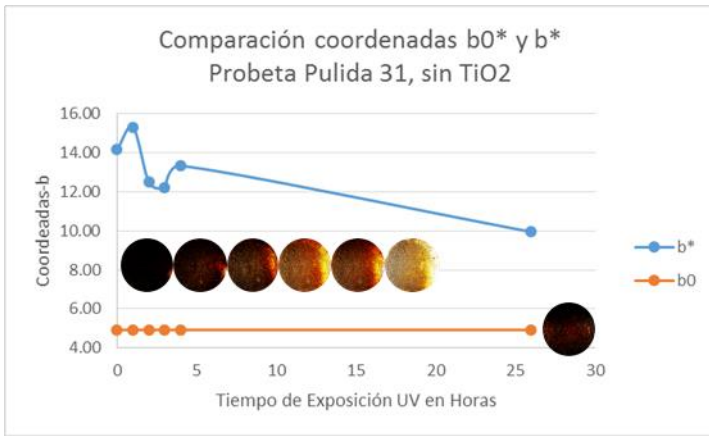
Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de mortero hechas a base de cemento gris adicionadas con 10% de dióxido de titanio, con humedad del 4.0%.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 29 10% TiO2			Probeta Pulida 30 10% TiO2			Probeta Rugosa 29 10% TiO2			Probeta Rugosa 30 10% TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	60.89	1.10	3.96	57.19	1.87	3.07	58.23	1.30	3.46	57.79	1.10	2.79
1	66.78	0.52	1.93	66.06	0.71	1.42	66.46	0.70	2.59	66.19	1.25	2.20
2	67.56	0.70	1.41	67.13	0.53	0.77	66.32	0.16	1.81	65.95	0.16	1.81
3	67.50	0.53	0.77	67.50	0.53	0.77	66.83	0.89	0.90	66.35	0.34	1.29
4	67.13	0.53	0.77	67.24	1.08	0.38	66.46	0.89	0.90	66.08	0.89	0.90
26	67.58	0.89	0.89	67.96	0.89	0.89	66.06	0.71	1.42	65.33	0.89	0.90
INICIAL	66.40	0.72	0.25	65.28	0.72	0.25	67.56	0.90	-0.27	67.82	0.36	0.12



Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	10% TiO2			
% Degradación	Pulida 29	Pulida 30	Rugosa 29	Rugosa 30
R-4	80.62	87.73	74.07	67.86
R-26	77.42	70.95	59.01	67.79

Reporte fotográfico de degradación de NO ₂ en probetas de mortero hechas a base de cemento gris sin adición de dióxido de titanio, en estado saturado superficialmente seco.								
Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
Tiempo de Exposición	Pulida 31		Pulida 32		Rugosa 31		Rugosa 32	
	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

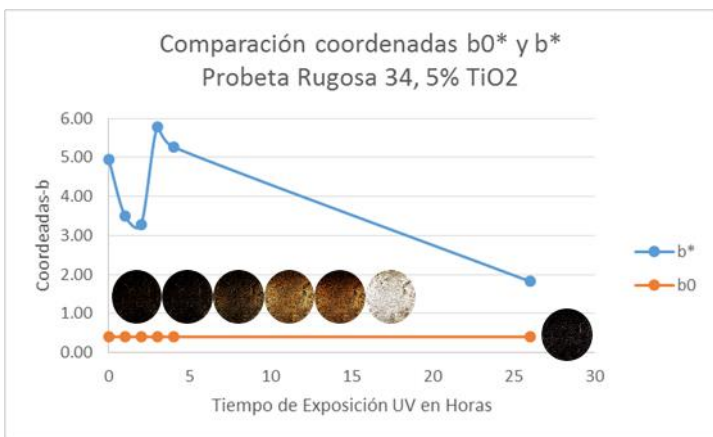
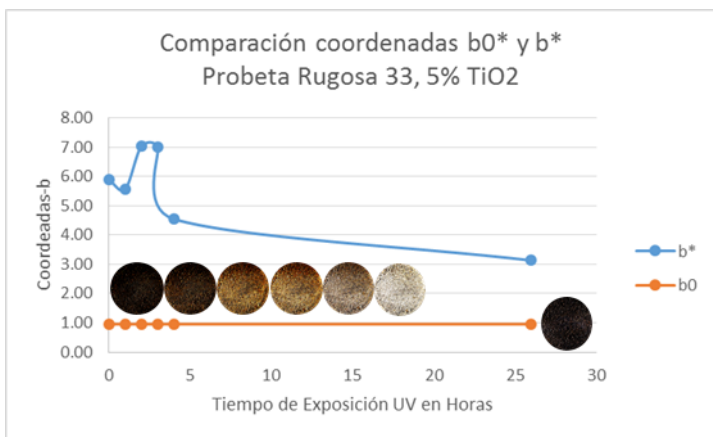
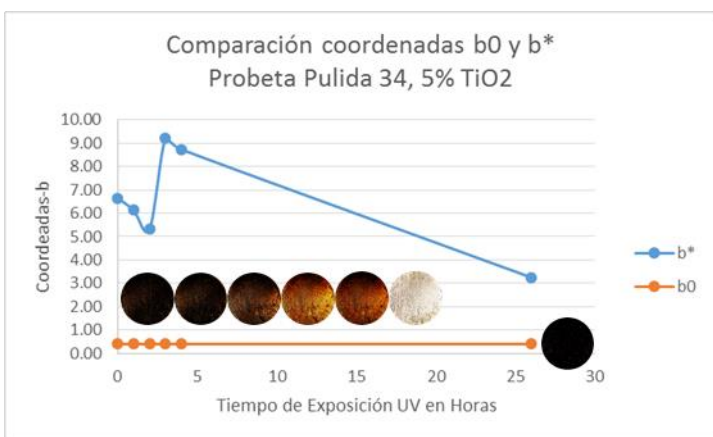
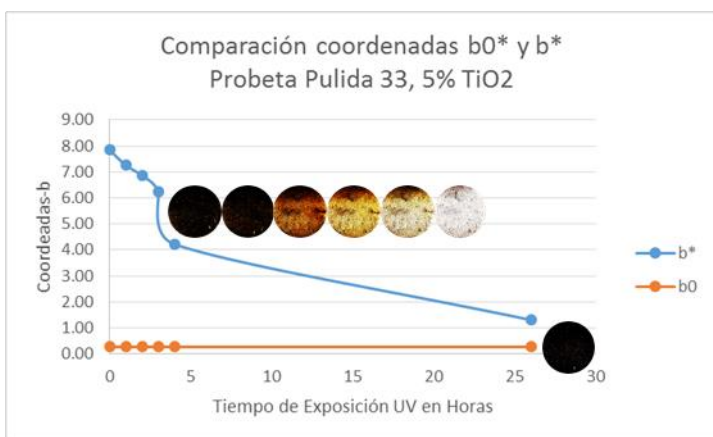
Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de mortero hechas a base de cemento gris sin adición de dióxido de titanio, muestra sss.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 31 sin TiO2			Probeta Pulida 32 sin TiO2			Probeta Rugosa 31 sin TiO2			Probeta Rugosa 32 sin TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	32.75	6.12	14.18	29.85	6.68	15.23	42.84	5.90	16.06	37.26	3.74	12.38
1	42.75	5.60	15.32	39.09	5.93	15.02	49.32	2.63	12.66	54.09	1.31	8.97
2	49.62	2.20	12.49	45.90	5.15	14.37	58.01	1.33	10.06	61.79	-0.03	3.55
3	54.27	5.28	12.24	52.91	4.32	14.34	60.78	0.08	8.34	62.60	0.34	2.49
4	52.64	3.23	13.34	51.78	2.99	12.69	62.62	-0.14	7.63	62.22	0.34	2.49
26	61.08	1.30	9.95	59.68	0.43	7.31	64.96	0.53	4.30	63.06	0.71	2.61
INICIAL	51.73	1.75	4.92	49.22	1.35	3.58	48.09	1.57	4.29	45.17	1.36	2.37



Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	Sin TiO2			
% Degradación	Pulida 31	Pulida 32	Rugosa 31	Rugosa 32
R-4	5.90	16.69	52.49	79.89
R-26	29.84	52.02	73.24	78.88

Reporte fotográfico de degradación de NO ₂ en probetas de mortero hechas a base de cemento gris adicionadas con 5% de dióxido de titanio, en estado saturado superficialmente seco.								
Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
Tiempo de Exposición	Pulida 33		Pulida 34		Rugosa 33		Rugosa 34	
	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de mortero hechas a base de cemento gris adicionadas con 5% de dióxido de titanio, muestra sss.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 33 5% TiO2			Probeta Pulida 34 5% TiO2			Probeta Rugosa 33 5% TiO2			Probeta Rugosa 34 5% TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	42.68	2.38	7.84	44.36	2.70	6.65	40.92	2.10	5.88	43.22	1.43	4.95
1	46.85	1.08	7.25	47.30	1.43	6.12	47.33	1.61	5.57	44.31	0.98	3.51
2	55.84	0.62	6.87	52.40	1.17	5.31	54.76	1.02	7.03	51.43	0.56	3.27
3	59.34	0.78	6.25	55.44	2.09	9.21	56.32	1.01	6.99	55.89	0.97	5.78
4	61.08	0.17	4.22	53.51	2.28	8.73	57.41	0.94	4.54	54.75	1.16	5.27
26	63.71	0.35	1.30	64.63	0.89	3.25	63.80	0.53	3.13	63.68	0.16	1.82
INICIAL	49.81	0.76	0.27	47.90	1.15	0.41	48.27	0.95	0.96	47.90	1.15	0.41



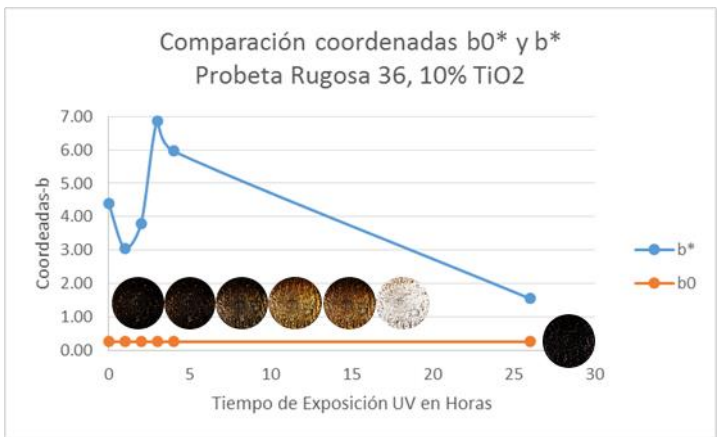
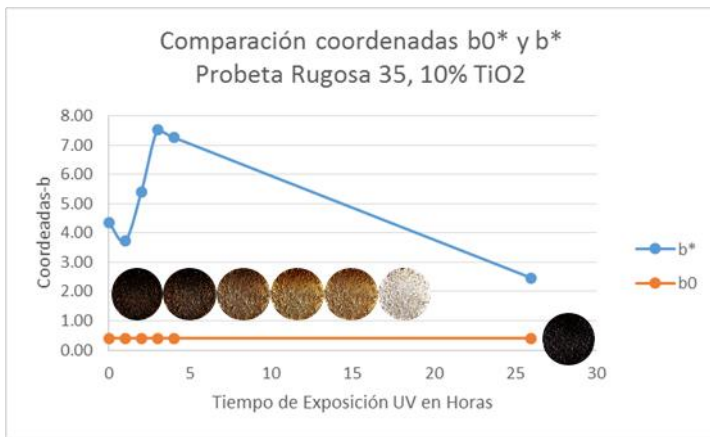
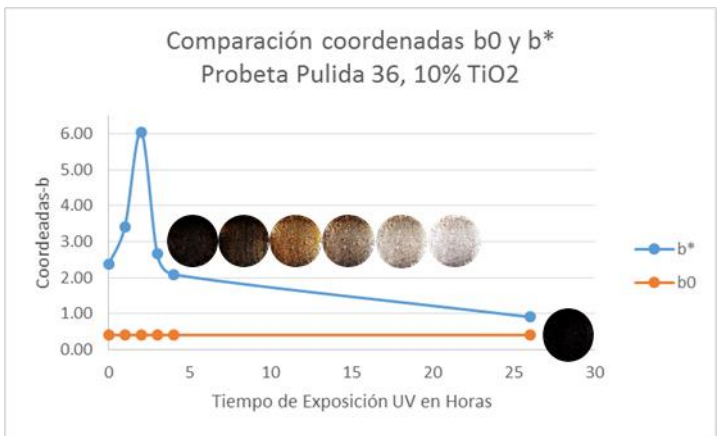
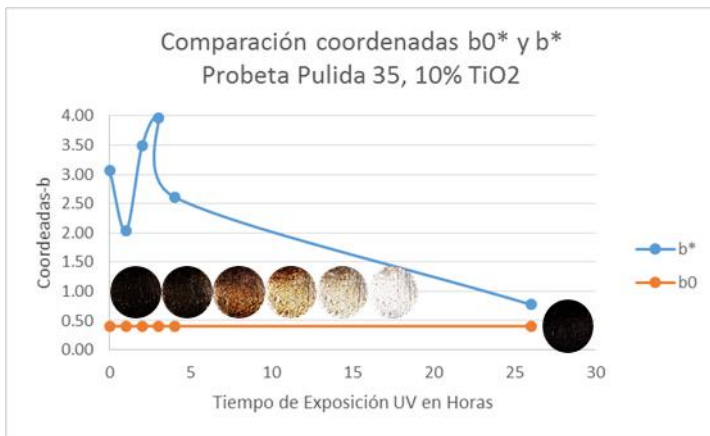
Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	5% TiO2			
% Degradación	Pulida 33	Pulida 34	Rugosa 33	Rugosa 34
R-4	46.21	-31.25	22.71	-6.39
R-26	83.43	51.08	46.72	63.17

Reporte fotográfico de degradación de NO₂ en probetas de mortero hechas a base de cemento gris adicionadas con 10% de dióxido de titanio, en estado saturado superficialmente seco.










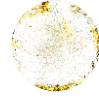



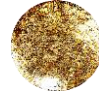

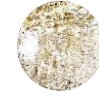

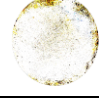







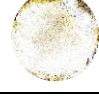



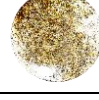

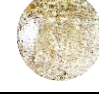





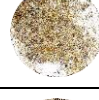



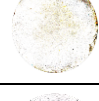
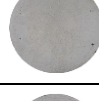
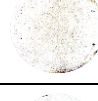



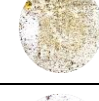







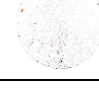
Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
	Pulida 35		Pulida 36		Rugosa 35		Rugosa 36	
Tiempo de Exposición	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de mortero hechas a base de cemento gris adicionadas con 10% de dióxido de titanio, muestra sss.

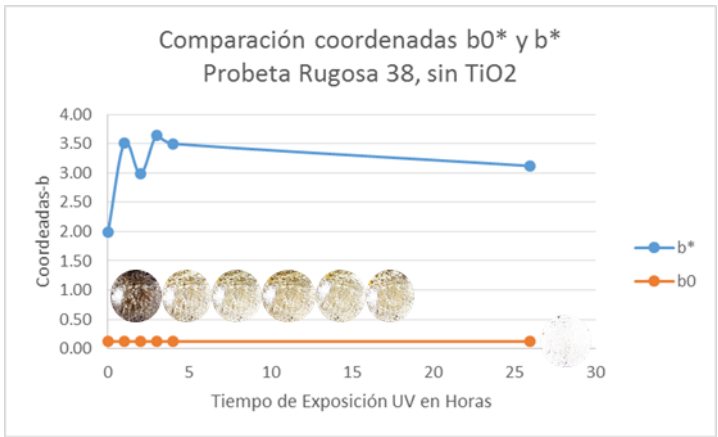
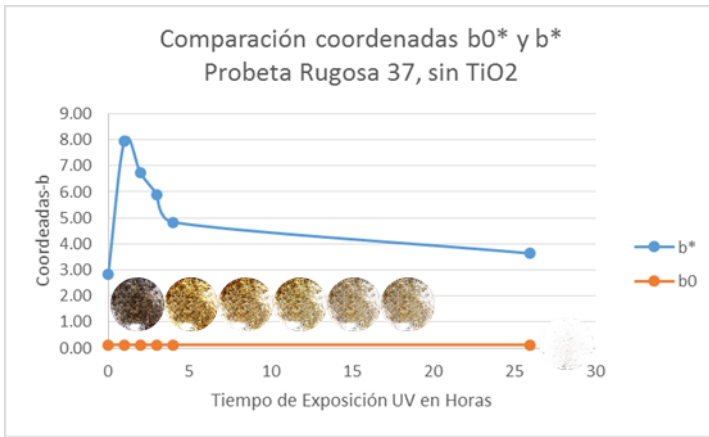
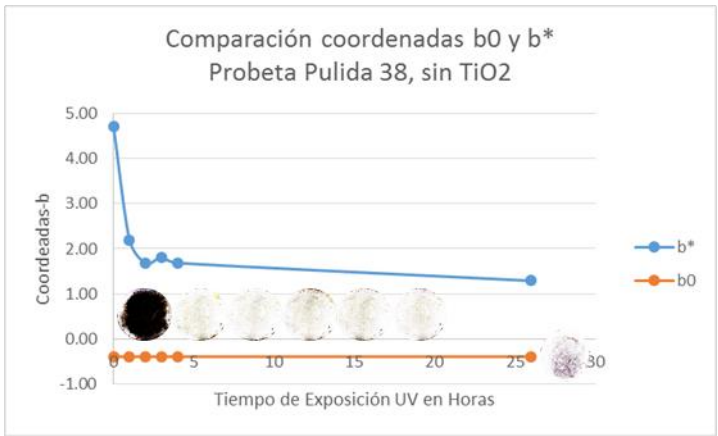
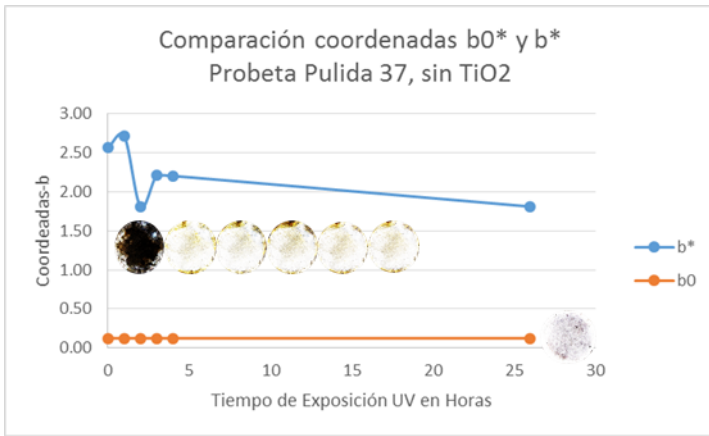
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 35 10% TiO2			Probeta Pulida 36 10% TiO2			Probeta Rugosa 35 10% TiO2			Probeta Rugosa 36 10% TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	45.64	1.56	3.07	45.98	1.36	2.37	44.87	1.60	4.35	42.43	1.62	4.40
1	51.79	0.55	2.04	50.72	0.95	3.42	48.91	1.75	3.73	47.25	1.55	3.05
2	55.91	1.31	3.49	56.46	1.74	6.05	54.45	1.55	5.41	52.58	0.37	3.80
3	60.51	1.10	3.96	57.70	0.73	2.66	56.68	0.83	7.52	55.84	0.62	6.87
4	63.06	0.71	2.61	62.71	0.90	2.09	56.88	1.78	7.26	54.03	1.37	5.96
26	65.25	0.53	0.77	64.20	0.90	0.90	64.87	0.34	2.47	64.63	1.08	1.55
INICIAL	49.50	1.14	0.40	48.30	1.15	0.40	47.10	1.16	0.41	47.81	0.77	0.27



Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	10% TiO2			
% Degradación	Pulida 35	Pulida 36	Rugosa 35	Rugosa 36
R-4	14.93	11.62	-66.82	-35.58
R-26	74.88	61.80	43.29	64.66

Reporte fotográfico de degradación de NO ₂ en probetas de concreto hechas a base de cemento gris sin adición de dióxido de titanio, con humedad del 2.2%.								
Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
Tiempo de Exposición	Pulida 37		Pulida 38		Rugosa 37		Rugosa 38	
	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

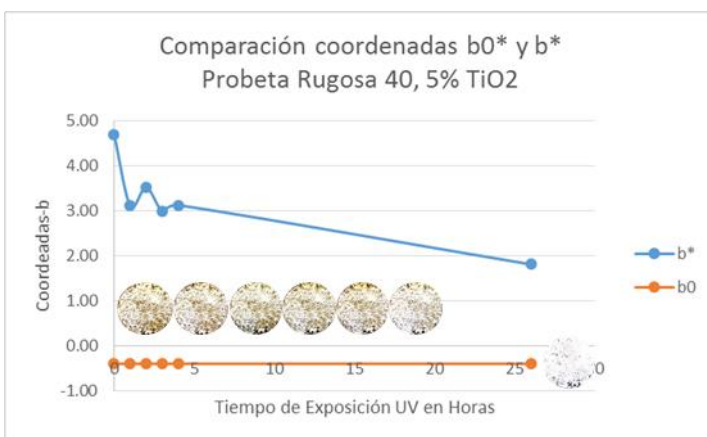
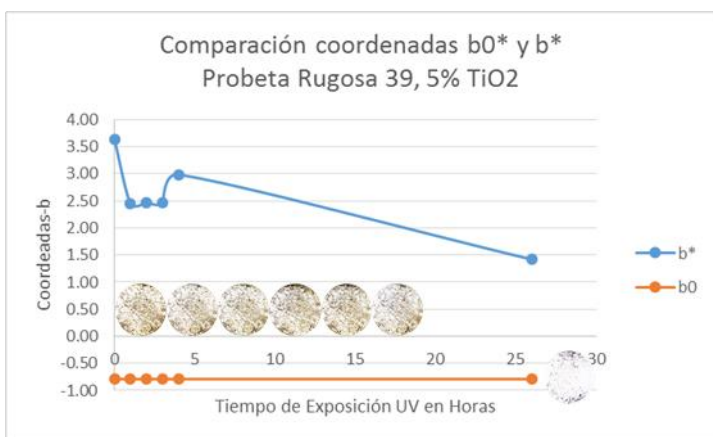
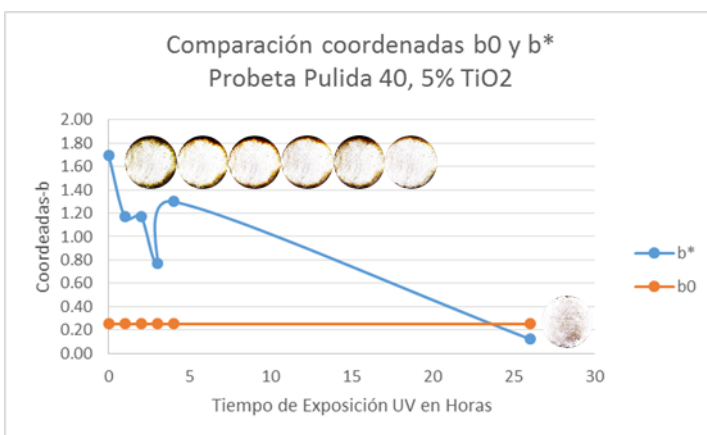
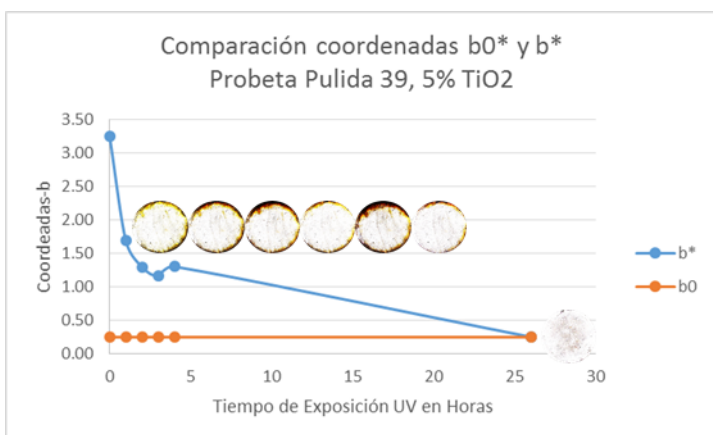
Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de concreto hechas a base de cemento gris sin adición de dióxido de titanio, con humedad del 2.2%.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 37 sin TiO2			Probeta Pulida 38 sin TiO2			Probeta Rugosa 37 sin TiO2			Probeta Rugosa 38 sin TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	53.34	0.36	2.57	47.57	0.99	4.72	55.46	1.11	2.82	58.42	0.54	1.99
1	66.57	-0.58	2.72	66.97	-0.39	2.20	60.89	0.63	7.94	65.20	-0.03	3.51
2	65.95	0.16	1.81	66.99	-0.21	1.68	62.00	0.59	6.72	65.60	0.15	2.98
3	65.09	-0.39	2.21	65.57	0.16	1.81	62.99	0.00	5.90	64.53	0.34	3.65
4	65.46	-0.39	2.21	65.49	-0.21	1.68	63.80	0.36	4.84	65.95	-0.03	3.50
26	65.57	0.16	1.81	66.35	0.34	1.29	65.28	0.34	3.64	64.93	0.52	3.12
INICIAL	65.19	0.36	0.12	64.47	0.55	-0.40	67.07	0.36	0.12	67.07	0.36	0.12



Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	Sin TiO2			
% Degradación	Pulida 37	Pulida 38	Rugosa 37	Rugosa 38
R-4	14.07	64.27	-71.68	-76.16
R-26	29.40	72.68	-29.13	-56.99

Reporte fotográfico de degradación de NO ₂ en probetas de concreto hechas a base de cemento gris adicionadas con 5% de dióxido de titanio, con humedad del 2.1%.								
Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
Tiempo de Exposición	Pulida 39		Pulida 40		Rugosa 39		Rugosa 40	
	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

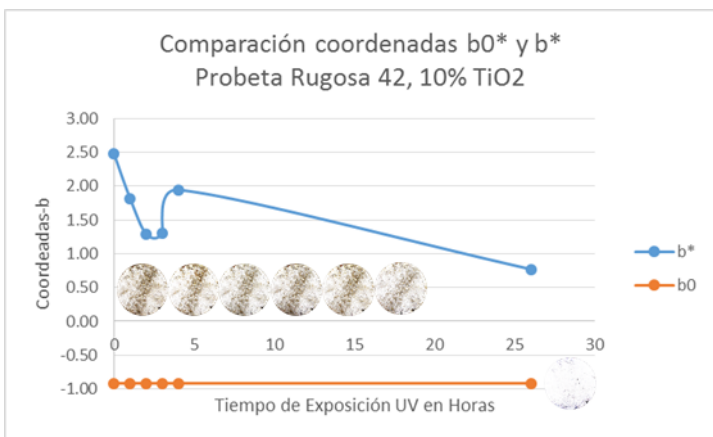
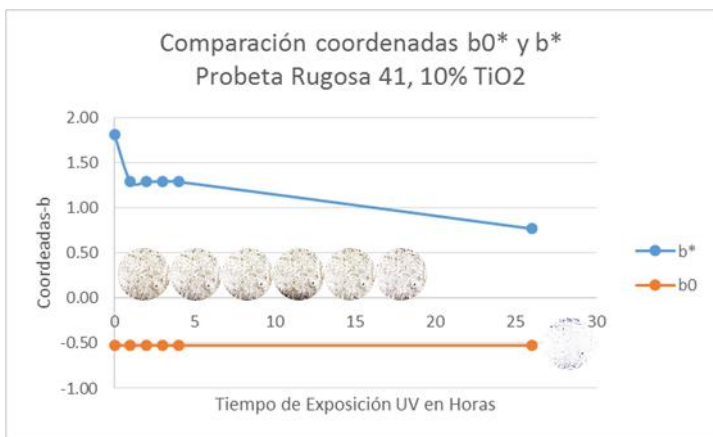
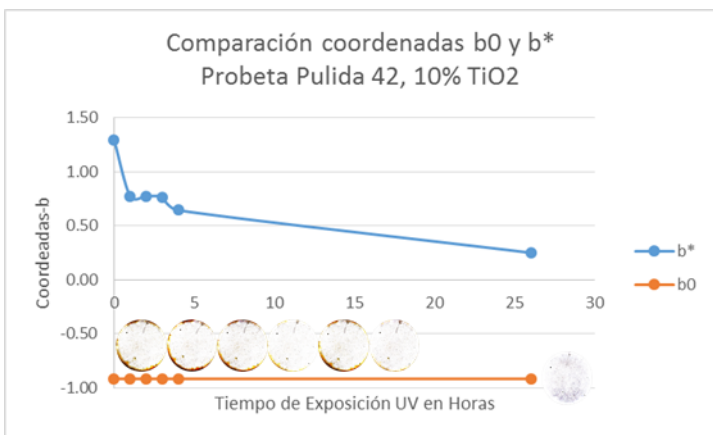
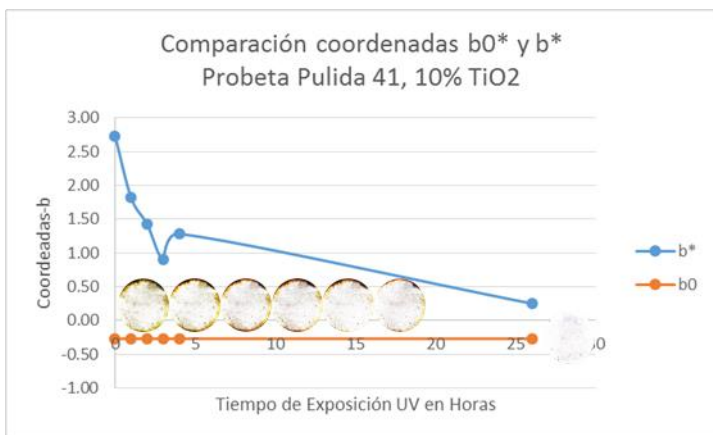
Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de concreto hechas a base de cemento gris adicionadas con 5% de dióxido de titanio, con humedad del 2.1%.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 39 5% TiO2			Probeta Pulida 40 5% TiO2			Probeta Rugosa 39 5% TiO2			Probeta Rugosa 40 5% TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	65.41	-0.76	3.25	63.22	-0.21	1.70	65.66	0.34	3.63	64.85	-0.02	4.69
1	64.36	-0.21	1.69	64.39	-0.02	1.17	66.00	0.34	2.46	65.31	0.52	3.12
2	63.71	0.35	1.30	63.63	-0.02	1.17	65.63	0.34	2.46	64.82	-0.03	3.51
3	66.27	-0.02	1.16	64.49	0.53	0.77	64.87	0.34	2.47	64.85	0.15	2.99
4	62.57	0.35	1.30	63.71	0.35	1.30	65.22	0.15	2.99	64.93	0.52	3.12
26	64.52	0.72	0.25	64.44	0.36	0.12	65.68	0.71	1.42	66.32	0.16	1.81
INICIAL	64.90	0.72	0.25	63.38	0.73	0.25	65.71	1.10	-0.79	66.35	0.55	-0.40



Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	5% TiO2			
% Degradación	Pulida 39	Pulida 40	Rugosa 39	Rugosa 40
R-4	59.87	23.43	17.81	33.47
R-26	92.26	92.74	60.94	61.45

Reporte fotográfico de degradación de NO ₂ en probetas de concreto hechas a base de cemento gris adicionadas con 10% de dióxido de titanio, con humedad del 2.6%.								
Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
Tiempo de Exposición	Pulida 41		Pulida 42		Rugosa 41		Rugosa 42	
	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

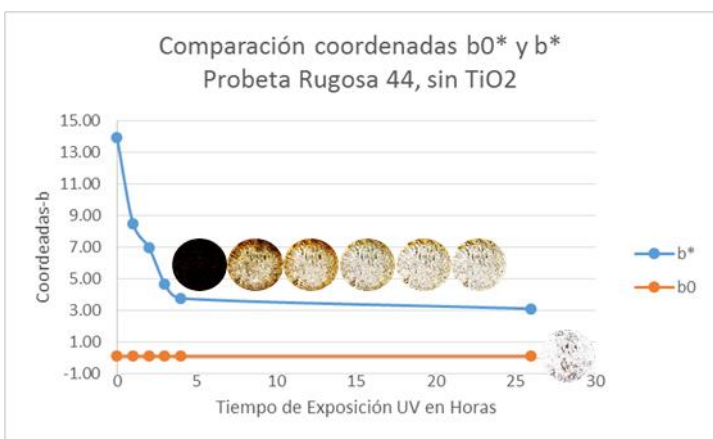
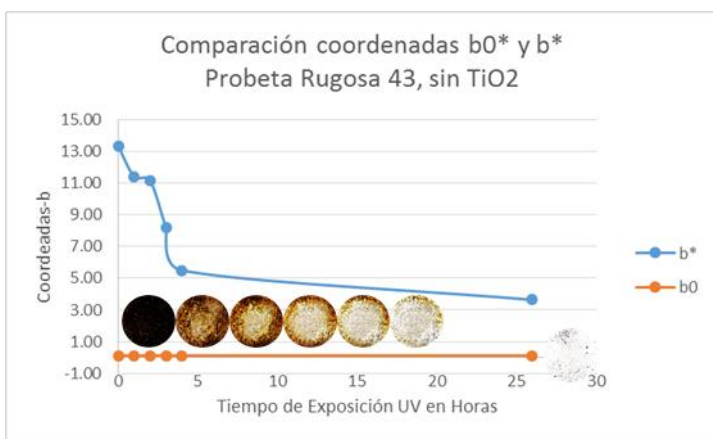
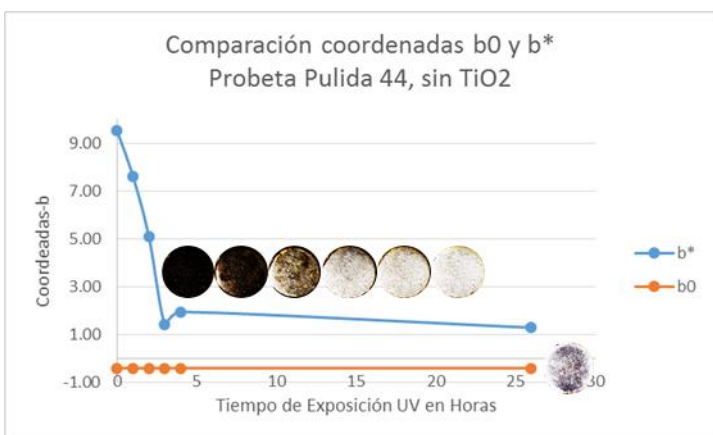
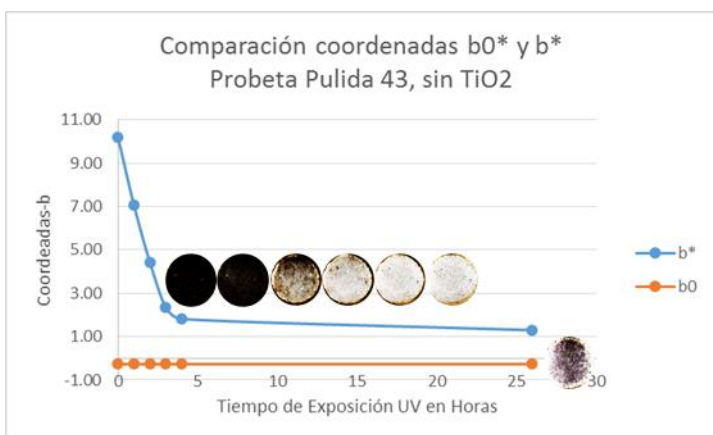
Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de concreto hechas a base de cemento gris adicionadas con 10% de dióxido de titanio, con humedad del 2.6%.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 41 10% TiO2			Probeta Pulida 42 10% TiO2			Probeta Rugosa 41 10% TiO2			Probeta Rugosa 42 10% TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	65.06	-0.58	2.73	65.22	0.34	1.29	65.57	0.16	1.81	64.50	0.34	2.47
1	64.44	0.16	1.82	64.49	0.53	0.77	65.22	0.34	1.29	65.20	0.16	1.81
2	64.55	0.71	1.42	64.87	0.53	0.77	65.98	0.34	1.29	65.60	0.34	1.29
3	64.58	0.90	0.90	68.62	0.53	0.76	64.84	0.34	1.29	64.47	0.35	1.30
4	67.48	0.34	1.28	65.17	0.17	0.64	65.98	0.34	1.29	65.28	0.52	1.94
26	64.90	0.72	0.25	66.03	0.72	0.25	65.63	0.53	0.77	65.63	0.53	0.77
INICIAL	66.43	0.91	-0.27	65.63	0.74	-0.92	65.90	0.19	-0.52	66.38	0.74	-0.91



Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	10% TiO2			
% Degradación	Pulida 41	Pulida 42	Rugosa 41	Rugosa 42
R-4	52.98	50.21	28.83	21.36
R-26	90.81	80.66	57.47	68.81

Reporte fotográfico de degradación de NO ₂ en probetas de concreto hechas a base de cemento gris sin adición de dióxido de titanio, en estado saturado superficialmente seco.								
Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
Tiempo de Exposición	Pulida 43		Pulida 44		Rugosa 43		Rugosa 44	
	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de concreto hechas a base de cemento gris sin adición de dióxido de titanio, muestra sss.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 43 sin TiO2			Probeta Pulida 44 sin TiO2			Probeta Rugosa 43 sin TiO2			Probeta Rugosa 44 sin TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	33.12	2.54	10.18	33.99	2.68	9.54	37.95	2.97	13.33	34.81	4.01	13.89
1	40.04	1.76	7.05	44.62	1.93	7.62	54.56	1.45	11.41	60.48	0.47	8.49
2	56.55	0.56	4.42	57.00	0.76	5.09	57.19	1.01	11.16	62.93	1.34	6.97
3	63.66	-0.03	2.35	63.79	0.71	1.43	61.44	1.40	8.21	64.47	-0.02	4.70
4	65.20	0.16	1.81	64.52	0.52	1.95	63.48	0.55	5.50	65.36	0.71	3.77
26	64.84	0.34	1.29	65.98	0.34	1.29	65.28	0.34	3.64	65.68	0.52	3.11
INICIAL	59.98	0.93	-0.27	61.43	0.56	-0.40	65.95	0.36	0.12	65.19	0.36	0.12

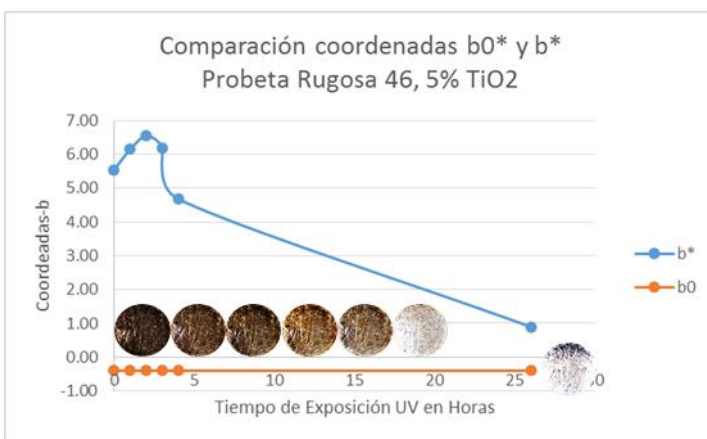
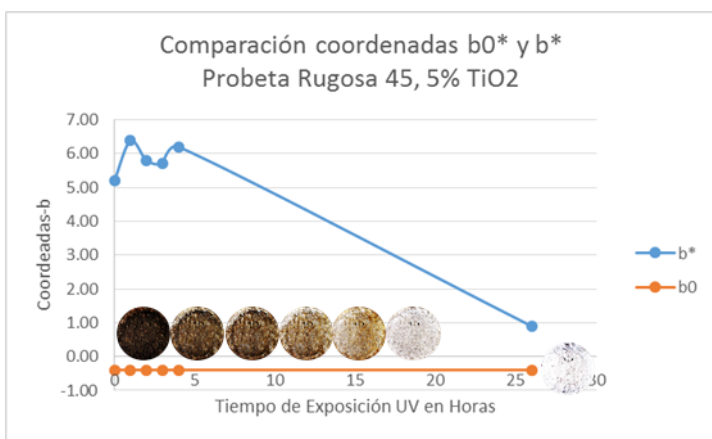
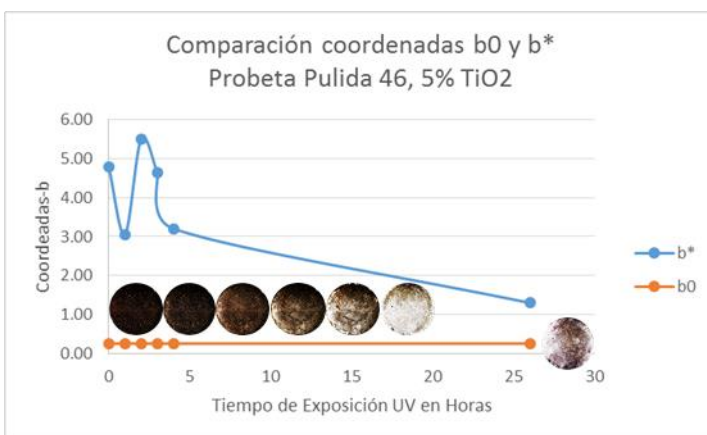
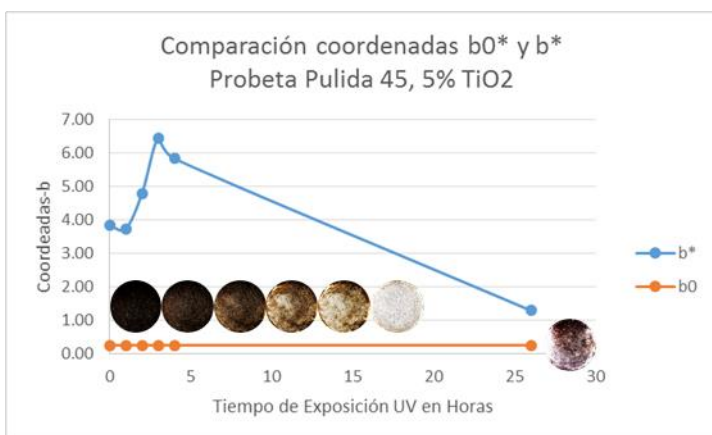


Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	Sin TiO2			
% Degradación	Pulida 43	Pulida 44	Rugosa 43	Rugosa 44
R-4	82.18	79.59	58.72	72.87
R-26	87.29	86.48	72.70	77.59

Reporte fotográfico de degradación de NO₂ en probetas de concreto hechas a base de cemento gris adicionadas con 5% de dióxido de titanio, en estado saturado superficialmente seco.

Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
	Pulida 45		Pulida 46		Rugosa 45		Rugosa 46	
	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de concreto hechas a base de cemento gris adicionadas con 5% de dióxido de titanio, muestra sss.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 45 5% TiO2			Probeta Pulida 46 5% TiO2			Probeta Rugosa 45 5% TiO2			Probeta Rugosa 46 5% TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	42.04	1.81	3.84	44.74	2.82	4.80	45.03	2.22	5.21	48.53	1.60	5.54
1	47.32	1.76	3.75	46.85	1.55	3.06	53.53	0.81	6.38	52.55	1.78	6.14
2	50.45	1.37	4.80	50.52	1.58	5.49	55.11	0.98	5.80	52.83	1.21	6.54
3	55.96	1.18	6.46	51.94	0.96	4.63	59.37	0.95	5.71	56.55	2.13	6.19
4	59.84	1.33	5.84	56.90	0.54	3.20	61.64	0.76	6.20	57.49	1.32	4.68
26	65.60	0.34	1.29	63.71	0.35	1.30	66.46	0.89	0.90	66.46	0.89	0.90
INICIAL	58.80	0.74	0.26	59.57	0.73	0.26	65.22	0.55	-0.40	63.33	0.55	-0.40

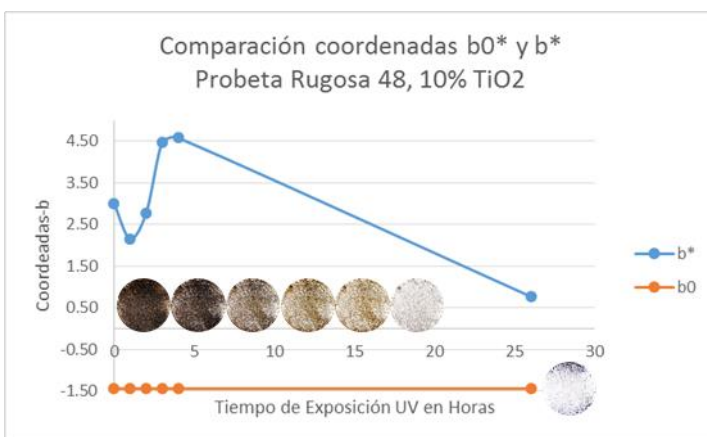
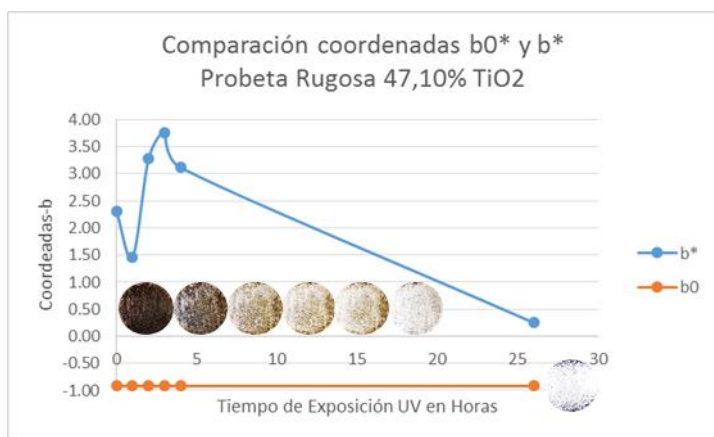
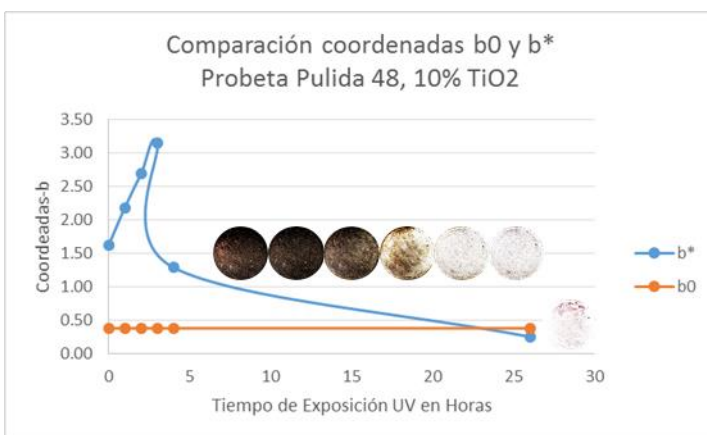
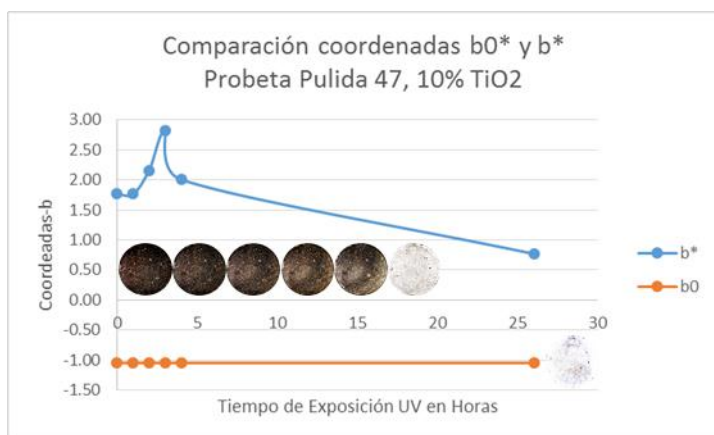


Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	5% TiO2			
% Degradación	Pulida 45	Pulida 46	Rugosa 45	Rugosa 46
R-4	-52.23	33.21	-19.08	15.54
R-26	66.35	72.93	82.77	83.80

Reporte fotográfico de degradación de NO₂ en probetas de concreto hechas a base de cemento gris adicionadas con 10% de dióxido de titanio, en estado saturado superficialmente seco.

Tipo de Acabado	Pulido				Rugoso			
	Pulida 47		Pulida 48		Rugosa 47		Rugosa 48	
	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada	Fotografía Original	Fotografía Contrastada
0 horas								
1 hora								
2 horas								
3 horas								
4 horas								
26 horas								
Probeta inicial								

Coordenadas de espacio de color CIE L*a*b*, en probetas de concreto hechas a base de cemento gris adicionadas con 10% de dióxido de titanio, muestra sss.												
Tipo de Acabado	Pulido						Rugoso					
Número de probetas	Probeta Pulida 47 10% TiO2			Probeta Pulida 48 10% TiO2			Probeta Rugosa 47 10% TiO2			Probeta Rugosa 48 10% TiO2		
Tiempo de Exposición	Coordenadas L*a*b*											
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0	51.60	1.51	1.77	52.30	1.12	1.62	51.57	1.32	2.31	51.63	1.52	3.00
1	51.60	1.51	1.77	50.29	0.94	2.18	57.67	0.73	1.46	54.23	0.93	2.15
2	53.06	0.93	2.16	54.60	0.74	2.69	62.74	0.90	3.27	59.71	1.09	2.78
3	54.29	1.12	2.83	61.90	0.53	3.15	65.36	0.71	3.77	62.01	0.92	4.47
4	55.71	0.54	2.01	66.35	0.34	1.29	65.31	0.52	3.12	63.99	1.28	4.58
26	66.00	0.53	0.77	66.03	0.72	0.25	66.78	0.72	0.25	67.13	0.53	0.77
INICIAL	63.66	0.39	-1.05	64.98	1.08	0.38	64.49	0.74	-0.92	63.77	0.94	-1.44



Porcentaje de degradación en coordenadas de espacio de color b*.				
Tipo de Probeta	10% TiO2			
% Degradación	Pulida 47	Pulida 48	Rugosa 47	Rugosa 48
R-4	-13.65	20.64	-34.77	-52.65
R-26	56.40	84.59	89.21	74.41

7.4.3 Resultados obtenidos e interpretación de resultados de autolimpieza de dióxido de nitrógeno NO₂

Con el propósito de monitorizar la fotodegradación de la mancha generada por el dióxido de nitrógeno sobre la superficie de nuestras probetas calculan los factores R4 y R26, anteriormente descritos en el apartado 7.3.3.

Al analizar los datos de la coordenada de color b* se pudo observar que las gráficas de decoloración son más constantes; sin embargo se siguen teniendo irregularidades en la graficas ya que algunas de estas son muy fluctuantes en sus valores, provocando que al momento de obtener los factores de degradación R4 y R26 en ocasiones los valores sean negativos, debido a que al momento de realizar la medición de color con la aplicación GIMP, la coordenada evaluada ya seas R4 o R26 es mayor a la coordenada de partida R0, lo que nos provoca los valores negativos, indicando que en vez de haber recuperación de color, este aumenta, lo cual no es congruente comparando visualmente las probetas.

Porcentaje de degradación coordenadas de espacio de color b*												
Probetas de concreto hechas a base de cemento gris.												
Tipo de Probeta	Humedad 3.6%				Humedad 4.6%				Humedad 4.0%			
	Sin TiO2				5% TiO2				10% TiO2			
% Degradación	Pulida 25	Pulida 26	Rugosa 25	Rugosa 26	Pulida 27	Pulida 28	Rugosa 27	Rugosa 28	Pulida 29	Pulida 30	Rugosa 29	Rugosa 30
R-4	-25.28	-17.85	-4.37	9.32	73.09	84.80	70.74	73.08	80.62	87.73	74.07	67.86
R-26	-34.84	-12.87	-2.76	-3.32	73.03	84.69	77.95	71.19	77.42	70.95	59.01	67.79
Probetas de concreto hechas a base de cemento gris, muestras saturadas superficialmente secas.												
Tipo de Probeta	Sin TiO2				5% TiO2				10% TiO2			
	Pulida 31	Pulida 32	Rugosa 31	Rugosa 32	Pulida 33	Pulida 34	Rugosa 33	Rugosa 34	Pulida 35	Pulida 36	Rugosa 35	Rugosa 36
R-4	5.90	16.69	52.49	79.89	46.21	-31.25	22.71	-6.39	14.93	11.62	-66.82	-35.58
R-26	29.84	52.02	73.24	78.88	83.43	51.08	46.72	63.17	74.88	61.80	43.29	64.66
Probetas de concreto hechas a base de cemento gris.												
Tipo de Probeta	Humedad 2.2%				Humedad 2.1%				Humedad 2.6%			
	Sin TiO2				5% TiO2				10% TiO2			
% Degradación	Pulida 37	Pulida 38	Rugosa 37	Rugosa 38	Pulida 39	Pulida 40	Rugosa 39	Rugosa 40	Pulida 41	Pulida 42	Rugosa 41	Rugosa 42
R-4	14.07	64.27	-71.68	-76.16	59.87	23.43	17.81	33.47	52.98	50.21	28.83	21.36
R-26	29.40	72.68	-29.13	-56.99	92.26	92.74	60.94	61.45	90.81	80.66	57.47	68.81
Probetas de concreto hechas a base de cemento gris, muestras saturadas superficialmente secas.												
Tipo de Probeta	Sin TiO2				5% TiO2				10% TiO2			
	Pulida 43	Pulida 44	Rugosa 43	Rugosa 44	Pulida 45	Pulida 46	Rugosa 45	Rugosa 46	Pulida 47	Pulida 48	Rugosa 47	Rugosa 48
R-4	82.18	79.59	58.72	72.87	-52.23	33.21	-19.08	15.54	-13.65	20.64	-34.77	-52.65
R-26	87.29	86.48	72.70	77.59	66.35	72.93	82.77	83.80	56.40	84.59	89.21	74.41

TABLA 7.6: FACTORES R4 Y R26 EN PROBETAS DE MORTERO Y DE CONCRETO.

En la tabla 7.6 se puede observar que tanto las probetas de concreto y de mortero ensayadas con la humedad absorbida del medio ambiente, cumplen con los factores R4 y R26 establecidos por la norma UNI: 11259:2008, siendo la única excepción la probeta Rugosa 39, que en su factor R4 no cumple con el 20% de degradación de color, quedándose a un 17.81% de degradación. En lo que corresponde a las probetas de concreto y mortero en estado SSS, solo cumplen con los factores R4 y R26 pulida 33, pulida 46 y pulida 48, las cuales son adicionadas con nanopartículas de dióxido de titanio de 5% para las primeras dos probetas y 10% para la última. A si mismo se presentó degradación de color que

cumple con los factores de la norma UNI: 11259:2008, en las probetas rugosa 31, rugosa 32, pulida 38, pulida 43, pulida 44, rugosa 43 y rugosa 44, sin embargo este comportamiento no es el esperado debido a que el concreto por sí solo no tiene propiedades de autolimpieza.

Derivado de los factores obtenidos y no siendo lo esperado en el procedimiento experimental, se decidió evaluar las probetas visualmente, por lo que las imágenes obtenidas de cada probeta fueron trabajadas en el programa GIMP, aumentándoles el contrastes 127% y disminuyéndoles el brillo 25%, permitiéndonos ver el color que predominaba en la fotografía. Debido a esto en cada tabla del reporte fotográfico se le añadió una columna con la foto modificada por el programa GIMP, para hacer la comparativa de la foto original y la foto modificada; a continuación se presentan los reportes fotográfico resumido de las probetas ensayadas, con el fin de facilitarse la inspección visual de las mismas.

Reporte visual probetas de mortero													
Características		No. de Probeta	Tiempo de Exposición				Características		No. de Probeta	Tiempo de Exposición			
			0 hrs	4 hrs	26 hrs	Inicial				0 hrs	4 hrs	26 hrs	Inicial
Sin TiO ₂	Humedad 3.6%	Pulida 25					Sin TiO ₂	SSS	Pulida 31				
		Pulida 26							Pulida 32				
		Rugosa 25							Rugosa 31				
		Rugosa 26							Rugosa 32				
5% TiO ₂	Humedad 4.6%	Pulida 27					5% TiO ₂	SSS	Pulida 33				
		Pulida 28							Pulida 34				
		Rugosa 27							Rugosa 33				
		Rugosa 28							Rugosa 34				
10% TiO ₂	Humedad 4.0%	Pulida 29					10% TiO ₂	SSS	Pulida 35				
		Pulida 30							Pulida 36				
		Rugosa 29							Rugosa 35				
		Rugosa 30							Rugosa 36				

TABLA 7.7: REPORTE FOTOGRÁFICO RESUMIDO DE PROBETAS DE MORTERO.

Revisando de la tabla 7.7, se puede observar que existe degradación de NO₂ en los tres tipos de condiciones de ensayos, sin embargo en lo que corresponde a las probetas sin adición de nanopartículas de TiO₂ este no es determinante ya que una vez transcurridas las 26 hrs las manchas superficiales se siguen apreciando; observándose un fenómeno curioso en este tipo de probetas

correspondientes a las probetas rugosas 31 y 32, las cuales visualmente tienen una degradación total trascurriendo las 26 hrs, esto se puede deber a que estas al estar en estado SSS y su misma situación de rugosidad, la absorción de NO_2 , fue de una manera superficial y no penetrante como en los otros casos.

En cuanto a las probetas de mortero ensayadas con humedad absorbida del medio ambiente y adicionadas con 5% y 10% de nanopartículas de TiO_2 , se puede observar claramente en todas las probetas que existe una degradación casi instantánea de NO_2 , desde la primera hora de iniciada la prueba, culminando el ensayo a las 26hrs con unas probetas limpia, siendo las probetas adicionadas con 10% de nanopartículas de TiO_2 , las que presentan limpieza total.

Finalizando el análisis de las probetas de mortero en estado SSS y adicionadas con 5% y 10% de nanopartículas de TiO_2 , se observa una degradación continua de NO_2 , finalizando con las probetas limpias de NO_2 a las 26 hrs de exposición, presentante el mismo patrón que las probetas con humedad absorbida del medio ambiente, Siendo las probetas adicionadas con 10% de nanopartículas de TiO_2 , las que presentan limpieza total, al finalizar el ensayo de autolimpieza.

Reporte visual probetas de concreto													
Características		No. de Probeta	Tiempo de Exposición				Características		No. de Probeta	Tiempo de Exposición			
			0 hrs	4 hrs	26 hrs	Inicial				0 hrs	4 hrs	26 hrs	Inicial
Sin TiO_2	Humedad 2.2%	Pulida 37					Sin TiO_2	SSS	Pulida 43				
		Pulida 38							Pulida 44				
		Rugosa 37							Rugosa 43				
		Rugosa 38							Rugosa 44				
5% TiO_2	Humedad 2.1%	Pulida 39					5% TiO_2	SSS	Pulida 45				
		Pulida 40							Pulida 46				
		Rugosa 39							Rugosa 45				
		Rugosa 40							Rugosa 46				
10% TiO_2	Humedad 2.6%	Pulida 41					10% TiO_2	SSS	Pulida 47				
		Pulida 42							Pulida 48				
		Rugosa 41							Rugosa 47				
		Rugosa 42							Rugosa 48				

TABLA 7.8: REPORTE FOTOGRÁFICO RESUMIDO DE PROBETAS DE CONCRETO.

El análisis visual en las probetas de concreto ensayadas con humedad absorbida del medio ambiente no son representativas para una inspección visual debido a que la absorción de gas NO_2 en la probeta fue mínima y la manchas iniciales es combinación de H_2O y NO_2 absorbido, eliminándose el H_2O en la primera hora de exposición a la irradiación UV-A, quedando un mínimo de gas NO_2 impregnado en las orillas de las probetas, dificultando la inspección visual, debido al aérea mínima a inspeccionar.

Con respecto a las probetas ensayadas en estado SSS y sin adición de nanopartículas de TiO_2 , una vez transcurridas las 26 hrs de ensayo, se observó una degradación casi total, esto se puede deber a que estas al estar en estado SSS, la absorción de NO_2 , fue de una manera superficial y no penetrante como en los otros casos. Por el contrario las probetas adicionadas con 5% y 10% de nanopartículas de TiO_2 , absorbieron una mayor cantidad de NO_2 , el cual presenta una degradación continua, finalizando con las probetas limpias de NO_2 a las 26 hrs de exposición, siendo las probetas adicionadas con 10% de nanopartículas de TiO_2 , las que presentan limpieza total, al finalizar el ensayo de autolimpieza.

8 Análisis económico de mezclas normales vs mezclas adicionados con dióxido de titanio

En el presente capítulo se realizó un análisis económico de morteros y concretos normales y adicionados con nanopartículas de dióxido de titanio, con el fin de evaluar la rentabilidad que genera el uso de nanopartículas de dióxido de titanio en el ramo de la construcción.

8.1 Análisis de costo

Los precios básicos para la elaboración de mortero y concreto presentado en la tabla 8.1 y 8.2, se obtuvieron en la nube de construbase, el 30 de Octubre de 2017; con respecto al costo del dióxido de titanio se obtuvo en base a una cotización entregada al Instituto de Física UNAM.

Mezcla de mortero a base de cemento, arena y agua, con una proporción de 1:4 y relación A/C de 0.65.						Costo Unitario según tipo de mortero.		
Concepto	Unidad	P.U.	Op.	Cantidad	Importe	Normal	5% TiO2	10% TiO2
Cemento gris	Ton	\$ 3,103.00	*	0.32	\$ 1,003.39	\$ 1,003.39	\$ 1,003.39	\$ 1,003.39
Arena de mina	M ³	\$ 290.00	*	0.97	\$ 280.85	\$ 280.85	\$ 280.85	\$ 280.85
Agua de toma	M ³	\$ 26.99	*	0.21	\$ 5.67	\$ 5.67	\$ 5.67	\$ 5.67
5% TiO2	Kg	\$ 448.69	*	16.17	\$ 7,254.46	\$ -	\$ 7,254.46	\$ -
10% TiO2	Kg	\$ 448.69	*	32.34	\$ 14,508.93	\$ -	\$ -	\$ 14,508.93
Total						\$ 1,289.92	\$ 8,544.38	\$ 15,798.85

TABLA 8.1: COSTO UNITARIO 1 M³ DE MORTERO.

Concreto f' c 250 kg/cm ² , TMN 9.5 mm						Costo Unitario según tipo de concreto .		
Concepto	Unidad	P.U.	Op.	Cantidad	Importe	Normal	5% TiO2	10% TiO2
Cemento gris	Ton	\$ 3,103.00	*	0.37	\$ 1,146.39	\$ 1,146.39	\$ 1,146.39	\$ 1,146.39
Arena de mina	M ³	\$ 290.00	*	0.58	\$ 166.75	\$ 166.75	\$ 166.75	\$ 166.75
Grava de mina	M ³	\$ 310.00	*	0.51	\$ 157.17	\$ 157.17	\$ 157.17	\$ 157.17
Agua de toma	M ³	\$ 26.99	*	0.23	\$ 6.15	\$ 6.15	\$ 6.15	\$ 6.15
5% TiO2	Kg	\$ 448.69	*	18.47	\$ 8,288.30	\$ -	\$ 8,288.30	\$ -
10% TiO2	Kg	\$ 448.69	*	36.94	\$ 16,576.60	\$ -	\$ -	\$ 16,576.60
Total						\$ 1,476.46	\$ 9,764.76	\$ 18,053.06

TABLA 8.2: COSTO UNITARIO 1 M³ DE CONCRETO.

Como es esperado los costos tanto del mortero como del concreto suben linealmente de acuerdo a la cantidad añadida de TiO₂, aumentándose el costo en 662% y 1225% para morteros y concretos

adicionados con 5% y 10% de nanopartículas de dióxido de titanio respectivamente; el aumento de costo es el mismo para el mortero y concreto debido a que el aumento del costo es directamente proporcional a las adiciones de nanopartículas de dióxido de titanio. En la gráfica 8.1 se observa el aumento de costo de los mortero y concretos con sus diferentes adiciones de nanopartículas de dióxido de titanio.



GRÁFICA 8.1: COSTO UNITARIO DE MORTERO Y CONCRETO EN BASE A LAS ADICIONES DE TIO₂.

Con el fin de complementar el informe de costo-beneficio, se obtuvo el costo de limpieza de fachadas tanto en estructuras de concreto como de mortero, a través de la página de internet “**Generador de Precios México**”, tomando en cuenta un promedio en el costo de limpieza de fachadas exteriores de acuerdo al estado de conservación de la misma y el grado de dificultad, como se muestra en la tabla 8.3. La consulta de la página para el cálculo del costo de mantenimiento de fachadas fue el 30 de Octubre de 2017.

Limpieza química de fachada, mediante la aplicación de lanza de agua a presión con detergente neutro, hasta disolver la suciedad superficial, comenzando por las zonas más altas, aplicando el tratamiento en franjas horizontales completas.					
Mortero			Concreto		
Estado de Conservación	Grado de complejidad	P.U. (m ²)	Estado de Conservación	Grado de complejidad	P.U. (m ²)
Regular	Medio	\$ 157.10	Regular	Medio	\$ 160.03
Regular	Alto	\$ 172.86	Regular	Alto	\$ 175.91
Malo	Medio	\$ 171.34	Malo	Medio	\$ 174.52
Malo	Alto	\$ 188.54	Malo	Alto	\$ 192.03
Promedio		\$ 172.46	Promedio		\$ 175.62

TABLA 8.3: COSTO POR 1 M², LIMPIEZA DE FACHADAS SUPERFICIALES.

Para el correcto análisis de beneficio-costos, es necesario calcular el consumo de mortero y concreto en los elementos donde se llevará a cabo su aplicación, en el caso de mortero corresponde a recubrimientos definitivos de (aplanados) de 2.5 cm de espesor, a continuación en la tabla 8.4 se presenta el cálculo del volumen requerido de mortero para 1 m² de aplanado con mortero y su respectivo costo.

Costo mezcla de mortero en 1 m ² de aplanado.						
Tipo de Mortero	P.U. (m ³)	Lado (m)	Lado (m)	Espesor (m)	Vol. (m ³)	P.U. (m ²)
Sin TiO ₂	\$ 1,289.92	1	1	0.025	0.025	\$ 32.25
5% TiO ₂	\$ 8,544.38	1	1	0.025	0.025	\$ 213.61
10% TiO ₂	\$15,798.85	1	1	0.025	0.025	\$ 394.97

TABLA 8.4: COSTO MEZCLA DE MORTERO EN 1 M² DE APLANADO.

En lo que corresponde a la mezcla de concreto, se tiene una alternativa de usos más amplios, ya que se puede usar en diferentes estructuras urbanas, sin embargo en lo que corresponde a su eficiencia con el uso de nanopartículas de dióxido de titanio, se debe de utilizar en estructuras no tan esbeltas y que estén en contacto directo con el medio ambiente para justificar su uso, como es el caso de fachadas prefabricadas, banquetas y carpetas de concreto hidráulico; cabe mencionar que en el presente trabajo se evaluó únicamente el beneficio-costo de fachadas de concreto prefabricadas; calculando el volumen requerido de concreto para 1 m² de un panel prefabricado a base de concreto arquitectónico con una resistencia f_c de 250 kg/cm², y un espesor de 2.5 cm, a continuación en la tabla 8.5 se presenta el cálculo del volumen requerido de concreto y su respectivo costo.

Costo mezcla de concreto en 1 m ² de panel arquitectónico prefabricado.						
Tipo de Concreto	P.U. (m ³)	Lado (m)	Lado (m)	Espesor (m)	Vol. (m ³)	P.U. (m ²)
Sin TiO ₂	\$ 1,476.46	1	1	0.025	0.025	\$ 36.91
5% TiO ₂	\$ 9,764.76	1	1	0.025	0.025	\$ 244.12
10% TiO ₂	\$18,053.06	1	1	0.025	0.025	\$ 451.33

TABLA 8.5: COSTO MEZCLAS DE CONCRETO EN 1 M² DE PANEL ARQUITECTONICO PREFABRICADO.

8.2 Análisis beneficios-costos

El análisis de beneficio costo se llevó a cabo mediante una corrida de gasto inicial y erogaciones de mantenimiento a un periodo de diez años, tomando en cuenta que el mantenimiento de las fachadas se realiza cada dos años en mezclas sin adición de nanopartículas de dióxido de titanio, y a cada cinco años en mezclas adicionadas con 5% y 10% de nanopartículas de dióxido de titanio. A su vez se calculó el aumento anual del mantenimiento de fachadas, este punto se realizó obteniendo el promedio del índice IPC de México en lo que abarca de los años 2008 a 2017, se obtuvo un promedio debido a que en los últimos años el índice IPC ha sido variable, teniendo tanto a la alza como a la baja y no tiene un patrón continuo, por eso se decidió ser conservador y tomar un índice promedio del IPC. A continuación en la tabla 8.6 y 8.7, se presentan las corridas económicas de morteros y concretos sin adición y con adición de nanopartículas de dióxido de titanio.

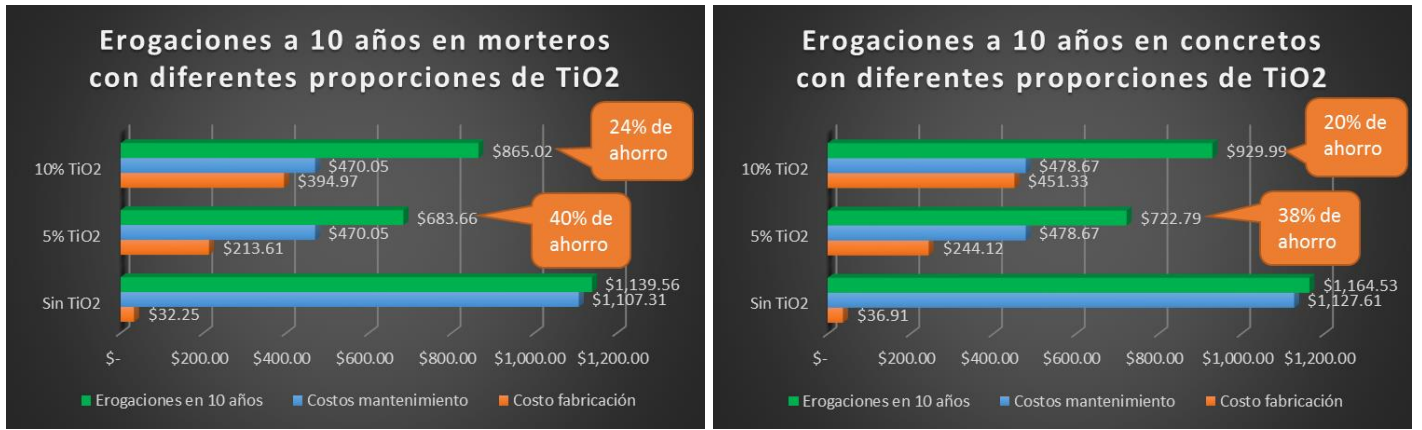
Promedio IPC 2008 a 2017		4.142%	4.142%	4.142%	4.142%	4.142%	4.142%	4.142%	4.142%	4.142%	4.142%	4.142%	
Costo de mantenimiento		\$ 172.46	\$ 179.60	\$ 187.04	\$ 194.79	\$ 202.86	\$ 211.26	\$ 220.01	\$ 229.12	\$ 238.61	\$ 248.50	\$ 258.79	
No. De Años		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL
1. EGRESOS MORTERO SIN TIO2													
1.1	Costo de fabricación	-\$ 32.25	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 32.25
1.2	Costo de mantenimiento	\$ -	\$ -	-\$ 187.04	\$ -	-\$ 202.86	\$ -	-\$ 220.01	\$ -	-\$ 238.61	\$ -	-\$ 258.79	-\$ 1,107.31
Total de Egresos:		-\$ 32.25	\$ -	-\$ 187.04	\$ -	-\$ 202.86	\$ -	-\$ 220.01	\$ -	-\$ 238.61	\$ -	-\$ 258.79	-\$ 1,139.56
No. De Años		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	VPN -\$ 894.55
1. EGRESOS MORTERO 5% TIO2													
1.1	Costo de fabricación	-\$ 213.61	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 213.61
1.2	Costo de mantenimiento	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 211.26	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 258.79	-\$ 470.05
Total de Egresos:		-\$ 213.61	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 211.26	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 258.79	-\$ 683.66
No. De Años		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	VPN -\$ 558.53
1. EGRESOS MORTERO 10% TIO2													
1.1	Costo de fabricación	-\$ 394.97	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 394.97
1.2	Costo de mantenimiento	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 211.26	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 258.79	-\$ 470.05
Total de Egresos:		-\$ 394.97	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 211.26	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 258.79	-\$ 865.02
No. De Años		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	VPN -\$ 739.89

TABLA 8.6: ANÁLISIS DE FLUJO ECONÓMICO EN MORTEROS SIN Y CON ADICIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITANIO.

Promedio IPC 2008 a 2017		4.142%	4.142%	4.142%	4.142%	4.142%	4.142%	4.142%	4.142%	4.142%	4.142%	4.142%	
Costo de mantenimiento		\$ 175.62	\$ 182.90	\$ 190.47	\$ 198.36	\$ 206.58	\$ 215.13	\$ 224.04	\$ 233.32	\$ 242.99	\$ 253.05	\$ 263.53	
No. De Años		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL
1. EGRESOS CONCRETO SIN TIO2													
1.1	Costo de fabricación	-\$ 36.91	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 36.91
1.2	Costo de mantenimiento	\$ -	\$ -	-\$ 190.47	\$ -	-\$ 206.58	\$ -	-\$ 224.04	\$ -	-\$ 242.99	\$ -	-\$ 263.53	-\$ 1,127.61
Total de Egresos:		-\$ 36.91	\$ -	-\$ 190.47	\$ -	-\$ 206.58	\$ -	-\$ 224.04	\$ -	-\$ 242.99	\$ -	-\$ 263.53	-\$ 1,164.53
No. De Años		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	VPN -\$ 915.02
1. EGRESOS CONCRETO 5% TIO2													
1.1	Costo de fabricación	-\$ 244.12	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 244.12
1.2	Costo de mantenimiento	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 215.13	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 263.53	-\$ 478.67
Total de Egresos:		-\$ 244.12	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 215.13	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 263.53	-\$ 722.79
No. De Años		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	VPN -\$ 595.36
1. EGRESOS CONCRETO 10% TIO2													
1.1	Costo de fabricación	-\$ 451.33	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 451.33
1.2	Costo de mantenimiento	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 215.13	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 263.53	-\$ 478.67
Total de Egresos:		-\$ 451.33	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 215.13	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 263.53	-\$ 929.99
No. De Años		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	VPN -\$ 802.57

TABLA 8.7: ANÁLISIS DE FLUJO ECONÓMICO EN CONCRETOS SIN Y CON ADICIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE DIÓXIDO DE TITANIO.

Se puede observar en las gráficas 8.2 que en ambos casos de estudio, los gastos proyectados a diez años por mantenimiento y por costo inicial, las erogaciones son mayores en las mezclas sin adición de nanopartículas de dióxido de titanio, en comparación de las mezclas adicionales con 5% y 10% de nanopartículas de dióxido, las cuales presentan un ahorro a los diez años entre el 40% y 24% respectivamente.



GRÁFICA 8.2: EROGACIONES DE FABRICACIÓN DE MANTENIMIENTO DE 1 M² DE MORTERO Y CONCRETO EN BASE A LAS ADICIONES DE TiO₂.

Claramente se puede corroborar que la relación beneficio-cotos es factible, debido que a pesar que los morteros y concretos adicionados con 5% y 10% de nanopartículas dióxido de titanio estén entre 662% y 1225% más caros respectivamente, sin embargo el beneficio de mantenimiento a los diez años es mucho mayor ya que estos presentan un ahorro entre 40% y 24% respectivamente.

9 Conclusiones y comentarios

Una vez evaluada la inspección visual de las probetas ensayadas en las pruebas de autolimpieza superficial de azul de metileno y de NO₂, las conclusiones principales son las siguientes:

- ✓ La irradiación UV-A degrada las manchas superficiales presentes en las probetas de mortero y concreto, en los tres tipos de condiciones ensayadas, debido a la interacción directa de la irradiación UV-A con la mancha superficial de la probeta, sin embargo en las probetas sin adición de nanopartículas dióxido de titanio, la degradación de color no es lo suficiente para considerar las probetas fotocatalíticas.
- ✓ La degradación de manchas superficiales en las probetas ensayadas aumenta agregando una mayor cantidad de nanopartículas de dióxido de titanio en las probetas, teniendo la mayor degradación en las probetas adicionadas con 10% de nanopartículas de dióxido de titanio.
- ✓ Existe una mayor degradación de manchas superficiales en las probetas pulidas que en las probetas rugosas, esto se debe a que en las superficies pulidas la luz UV-A penetra de lleno a las probetas, en cambio las probetas rugosas por si mismas características de irregularidad la luz no penetra directamente en toda la sección.
- ✓ La degradación de gas contaminante es más rápida que en el caso de las manchas superficiales orgánicas, lo que lo hacen un proyecto viable para mitigar la contaminación atmosférica en la ZMVM.
- ✓ La aplicación de morteros y concretos adicionados con nanopartículas de dióxido de titanio, económicamente es factible ya que a pesar de tener un costo de implementación más elevado, el ahorro a lo largo de diez años es mayor.

Para concluir, el desarrollo experimental del presente trabajo abre un área de oportunidad al sector constructivo de nuestro país al poder obtener construcciones que mantengan su coloración a lo largo del tiempo sin que esta se vea afectada por la decoloración o manchas ocurridas principalmente por la contaminación atmosférica, otro plus que agrega este tipo de investigación es que se puede eliminar contaminantes atmosféricos como es el caso del dióxido de nitrógeno por medio de estructuras de concreto o mortero adicionadas con nanopartículas de dióxido de titanio, teniendo un método más eficaz en la Ciudad de México, para hacer frente al creciente problema de emisiones contaminantes que presenta la Ciudad, en vez de estar tratado de mitigar tales efectos con un programa como el HOY NO CIRCULA.

10 Bibliografía

- (1) CANTÚ MARTÍNEZ PEDRO CÉSAR, *Contaminación Ambiental*, 2da edic., Ed. Diana, México 1992, pp. 13-22.
- (2) STRAUSS W., MAINWARING S.J., *Contaminación del aire: causas, efectos y soluciones*, 1era edic., Ed. Trillas, México 1990, pp. 9-11.
- (3) INECC, [Fecha de consulta: 15 Enero 2016], disponible en: <<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/574/cap5.pdf>>, p.124.
- (4) STRAUSS W., MAINWARING S.J., *Contaminación del aire: causas, efectos y soluciones*, 1era edic., Ed. Trillas, México 1990, pp. 58-59.
- (5) ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD & ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, *Evaluación de los Efectos de la Contaminación del Aire en la Salud de América Latina y el Caribe*, Washington 2005, p. 26.
- (6) INECC, [Fecha de consulta: 15 Enero 2016], disponible en: <<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/574/cap5.pdf>>, p.125.
- (7) ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD & ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, *Evaluación de los Efectos de la Contaminación del Aire en la Salud de América Latina y el Caribe*, Washington 2005, p. 5.
- (8) RICHARD W. BOUBEL, DONALD L. FOX, D. BRUCE TURNER & ARTHUR C. STERN, *Fundamentals of Air Pollution*, 3era edic., Ed. Academic Press, USA 1994, pp. 121-122.
- (9) STRAUSS W., MAINWARING S.J., *Contaminación del aire: causas, efectos y soluciones*, 1era edic., Ed. Trillas, México 1990, pp. 67-70.
- (10) NOVAIS JOSÉ ANTONIO, *La contaminación atmosférica en el deterioro del patrimonio monumental: medidas de prevención*, Instituto de Geología Económica, Madrid, España, pp. 57- 59.
- (11) BROTO CARLES, SORIA VERÓNICA , *Enciclopedia Broto de Patología de la Construcción*, Vol. 6, Ed. Links International, 2006, pp. 114-115.
- (12) SHEINBAUM PARDO CLAUDIA, *Revista de la Academia Mexicana de Ciencias*, Vol. 67, No. 3, julio-septiembre de 2016, México 2016, pp. 71-73.
- (13) SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE DEL DISTRITO FEDERAL, *Calidad del aire en la Ciudad de México informe 2014*, Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico, México, CDMX Junio2015, p. 41.
- (14) SIMAT, [Fecha de consulta: 16 Enero 2017], disponible en: <<http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZKBhnmWkYQ==%27>>.
- (15) Webcams de México, [Fecha de consulta: 20 Diciembre 2016], disponible en: <<https://www.maspormas.com/cdmx/fotogaleria-despues-de-la-tormenta-el-cielo-limpio-de-la-cdmx/>>.

- (16) **CASTRO PATIÑO LUISA FERNANDA**, *Titanio, El Metal más Resistente de la Industria*, Revista de Materiales, [Fecha de consulta: 08 Septiembre 2015], disponible en: <<http://docplayer.es/25731245-Titanio-el-metal-mas-resistente-de-la-industria-materiales-la-industria-aeroespacial-y-medica-aumenta-la-demanda-del-titanio-en-el-mundo.html>>, p. 28.
- (17) **Titanium Dioxide Whites**, [Fecha de consulta: 08 Septiembre 2015], disponible en: <<http://www.webexhibits.org/pigments/indiv/history/tiwhite.html>>.
- (18) **Alireza Khataee, G Ali Mansoori**, *Nanostructured Titanium Dioxide Materials; Properties, Preparation and Applications*, 1era edic., Ed. World Scientific, USA 2012, p. 1.
- (19) **DEPARTAMENTO DE PETROLOGÍA Y GEOQUÍMICA, UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**, *Atlas de Rocas Ígneas*, [Fecha de consulta: 10 Septiembre 2015], disponible en: <<https://petroigne.wordpress.com/minerales/otros-minerales-igneos/rutilo/>>.
- (20) **Asturnatura.com**, [Fecha de consulta: 10 Septiembre 2015], disponible en: <<http://www.asturnatura.com/mineral/anatasa/757.html>>.
- (21) **Granadanatural.com**, [Fecha de consulta: 10 Septiembre 2015], disponible en: <http://www.gradanatural.com/ficha_minerales.php?cod=172>, & **Minerales.com**, [Fecha de consulta: 10 Septiembre 2015], disponible en: <<http://www.mineral-s.com/brookita.html>>.
- (22) **University of Colorado**, Mineral Structure and Property Data, TiO₂ Group, [Fecha de consulta: 10 Septiembre 2015], disponible en: <<http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html>>.
- (23) **Titanium Dioxide Manufacturers Association For a Brighter Future, Titanium Dioxide Stewardship Council**, About Titanium Dioxide, p. 2.
- (24) **Reade.com**, [Fecha de consulta: 12 Septiembre 2015], disponible en: <<http://www.reade.com/products/titanium-dioxide-anatase-grade-tio2>>.
- (25) **BLESA MIGUEL A. & BLANCO GALEZ JULIÁN**, *Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua*, 1era edic., Ed. San Martín, Argentina 2005, pp. 137-138.
- (26) **Alireza Khataee, G Ali Mansoori**, *Nanostructured Titanium Dioxide Materials; Properties, Preparation and Applications*, 1era edic., Ed. World Scientific, USA 2012, p. 29-30.
- (27) **VARGAS URBANO MÓNICA ANDREA**, *Nanopartículas de TiO₂, Fase Anatasa, Sintetizadas por Métodos Químicos*, Artículo de Investigación: Ingeniería y Desarrollo, Vol. 29, No. 2 Julio-Diciembre, 2011, pp. 188-189.
- (28) **YOSHIHIKO OHAMA & DIONYS VAN GEMERT**, *Application of Titanium Dioxide Photocatalysis to Construction Materials*, 1 era edc., Ed. Rilem, USA 2011, pp. 1-2.
- (29) **Alireza Khataee, G Ali Mansoori**, *Nanostructured Titanium Dioxide Materials; Properties, Preparation and Applications*, 1era edic., Ed. World Scientific, USA 2012, p. 38.
- (30) **TX ACTIVE**, *Principio activo fotocatalítico*, artículo Italcementi Group, pp. 18-19.
- (31) **FARALDOS MARISOL**, *Guía Práctica de la Fotocatálisis Aplicada a Infraestructuras Urbanas*, Asociación Ibérica de Fotocatálisis, Congreso Nacional del Medio Ambiente, 2012, pp. 8-9.

- (32) RIVERA F., QUIÑONES C., VALLEJO W. & NARVAEZ J. R, *Instrumento Virtual Simulación de la Eficiencia Cuántica para Diferentes Materiales Semiconductores*, Revista Colombiana de Física, Vol. 40, No. 2, Julio 2008, pp. 406.
- (33) BLASE MIGUEL A., BLANCO GÁLVEZ JULIÁN, COMPILADORES Y EDITORES, *Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua, Compilación de los trabajos presentados en el encuentro SOLARSAFEWATER, "Tecnologías emergentes para estudiar los problemas del agua en países en desarrollo"*, Ed. San Martín, Buenos Aires : UNSAM, 2005, pp. 135-136.
- (34) A. MAURY & N. DE BELIE, *Estado del arte de los materiales a base de cemento que contienen TiO₂: propiedades auto-limpiantes*, Vol. 60, Materiales de construcción, 2010, p. 36.
- (35) Alireza Khataee, G Ali Mansoori, *Nanostructured Titanium Dioxide Materials; Properties, Preparation and Applications*, 1era edic., Ed. World Scientific, USA 2012, pp. 8-10.
- (36) SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE DEL DISTRITO FEDERAL, *Calidad del aire en la Ciudad de México informe 2013*, Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico, México, México D.F. 2013, pp. 36-37.
- (37) Wikipedia.com, [Fecha de consulta: 12 Noviembre 2016], disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagnético#/media/File:Electromagnetic_spectrum-es.svg>.
- (38) SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE DEL DISTRITO FEDERAL, *Calidad del aire en la Ciudad de México informe 2014*, Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico, México, CDMX Junio2015, pp. 35-36.
- (39) OHAMA YOSHIHIKO & VAN GEMERT •DIONYS, *Photocatalysis to Construction Materials*, 1 era edc., Ed. Rilem, USA 2011, pp. 1-2,8.
- (40) FARALDOS MARISOL, *Guía Práctica de la Fotocatálisis Aplicada a Infraestructuras Urbanas*, Asociación Ibérica de Fotocatálisis, Congreso Nacional del Medio Ambiente, 2012, pp. 8-10.
- (41) Alireza Khataee, G Ali Mansoori, *Nanostructured Titanium Dioxide Materials; Properties, Preparation and Applications*, 1era edic., Ed. World Scientific, USA 2012, pp. 8-10.
- (42) A. MAURY & N. DE BELIE, *Estado del arte de los materiales a base de cemento que contienen TiO₂: propiedades auto-limpiantes*, Vol. 60, Materiales de construcción, 2010, pp. 35-36.
- (43) RODRÍGUEZ GARCÍA JOSÉ RUBÉN, *Morteros fotocatalíticos: análisis de su autolimpieza en función del tipo de cemento y rugosidad superficial*, Trabajo fin de Master; Universidad Politécnica de Madrid, España 2012, p. 20.
- (44) MARÍA SIÑERIZ MARTÍNEZ, *Aplicaciones Arquitectónicas de los Nanomateriales en Base de Titanio Envolventes Fotocatalíticas*, Trabajo fin de grado; Universidad Politécnica de Madrid, España 2015, p. 14.

- (45) FARALDOS MARISOL, *Guía Práctica de la Fotocatálisis Aplicada a Infraestructuras Urbanas*, Asociación Ibérica de Fotocatálisis, Congreso Nacional del Medio Ambiente, 2012, pp. 8-10.
- (46) ORGANISMO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA EDIFICACIÓN, S. C., *NMX-C-085; Determinación estándar para el mezclado de pastas y morteros de cementantes hidráulicos*, México 2011, pp.6-7.
- (47) ORGANISMO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA EDIFICACIÓN, S. C., *NMX-C-159; Elaboración y curado de especímenes de laboratorio*, México 2004, p.11.