



UNIVERSIDAD
MAYOR

para espíritus emprendedores

Facultad de Ciencias

**CONSTRUCCIÓN
CIVIL**

FOTOCATÁLISIS APLICADA A LOS MATERIALES DE LA CONSTRUCCIÓN

Proyecto de título para optar al Título de Constructor Civil

Estudiante:

Guillermo Andalicio González Barriga

Profesor Guía:

Mg. Rodrigo Ternero Saavedra

Agosto 2018

Santiago, Chile

RESUMEN

El desarrollo de las ciudades tiene como consecuencia el aumento en la polución del aire lo que conlleva un ramificación de las enfermedades, de igual manera esto repercute en el deterioro de los revestimientos de las fachadas, ya que ésta polución tiene la capacidad de adherirse a las superficies. Una manera de ayudar a revertir estos problemas es la aplicación de las propiedades de la fotocatalisis, como una innovadora solución, en la fabricación de nuevos materiales de construcción, para que puedan convertirse en una alternativa viable en la descontaminación y dar una mejor calidad de vida a las personas.

Este trabajo de investigación tiene como finalidad realizar un estudio sobre materiales de construcción que aplican la fotocatalisis como principio para otorgar importantes propiedades tales como bactericida, autolimpieza y descontaminante del aire. Lo expuesto se logra incorporando dióxido de titanio como precursor o fuente para activar la fotocatalisis, el cual utiliza fuentes naturales como son los rayos UV, el aire y la humedad ambiental, necesarios para este proceso.

Las normativas existentes establecen los métodos de ensayo para cada una de estas propiedades, de tal forma que se pueda certificar cada una de estas a los distintos tipos de materiales. Además se recopilan y exponen distintos tipos de ensayos obtenidos de la literatura al respecto, los cuales indican tanto resultados como la mejor forma de aplicar el dióxido de titanio en la superficie de un material determinado. En conclusión en fachadas se busca autolimpieza y descontaminación de aire, en lugares más cerrados las propiedades más requeridas son las de bactericida y autolimpieza.

SUMMARY

The growth of the cities results in an increase in air pollution, which entails a ramification of the diseases, in the same way this affects the deterioration of the façade coatings, since this pollution has the capacity to adhere to the surfaces. One way to help reverse these problems is to apply the properties of photocatalysis, as an innovative solution, in the manufacture of new construction materials, so that they can become a viable alternative in decontamination and provide a better quality of life. to the people.

This research work aims to conduct a study on construction materials that apply photocatalysis as a principle to provide important properties such as bactericide, self-cleaning and decontaminating air. The above is achieved by incorporating titanium dioxide as a precursor or source to activate photocatalysis, which uses natural sources such as UV rays, air and humidity, necessary for this process.

The existing regulations establish the test methods for each of these properties, in such a way that each of these can be certified to the different types of materials. In addition, different types of tests obtained from the literature are collected and presented, which indicate both results and the best way to apply titanium dioxide on the surface of a given material. In conclusion on facades, self-cleaning and air decontamination is sought, in more closed places the most required properties are those of bactericide and self-cleaning.

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	2
SUMMARY	3
TABLA DE CONTENIDOS	4
INDICE DE TABLAS	5
INDICE DE GRAFICOS	6
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	7
1.1. Generalidades	9
1.2. Alcances y Limitaciones	9
1.3. Objetivos Generales	10
1.3.1. Objetivos Específicos	10
1.4. Historia y Evolución de la Fotocatálisis	10
1.5. Materiales Fotocatalíticos	11
1.5.1. Ventajas materiales fotocatalíticos	12
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	13
2.1. Introducción	13
2.2. Fotocatálisis. Aplicaciones y Propiedades	14
2.2.1. Bactericida por Fotocatálisis	14
2.2.2. Autolimpieza por Fotocatálisis	14
2.2.3. Descontaminante por Fotocatálisis	15
2.3. Fotocatálisis. Mecanismo de Acción	15
2.3.1. Dióxido de Titanio	18
2.4. Normativa Aplicable	19
2.4.1. Anticontaminante	20
2.4.2. Bactericida	20
2.4.3. Autolimpiante	21
CAPÍTULO 3: MÉTODOS DE ENSAYO Y DEMOSTRACIONES DE LAS PROPIEDADES DE LA FOTOCATÁLISIS	22
3.1. Introducción	22
3.2. Ensayo Autolimpieza	23
3.3. Ensayo Bactericida	29
3.4. Ensayo de Medición de Degradación de Compuestos Nocivos para la Atmósfera	34

CAPÍTULO 4: APLICACIONES Y USOS GENERALES DE LA FOTOCATÁLISIS EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	41
4.1. Cemento Fotocatalítico	41
4.2. Cerámica Fotocatalítica	42
4.3. Pintura Fotocatalítica	43
4.4. Vidrios Fotocatalíticos	47
CAPÍTULO 5: ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS	49
5.2. Análisis de Precio Unitario	49
5.1. Descripción del Lugar a Evaluar	49
5.3 Análisis de Retorno de la inversión	52
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
BIBLIOGRAFIA	56
ANEXOS	58
Estudio de Dióxido de Titanio y sus Efectos	58
Estudio de Efecto Cancerígeno	60
Reportaje Asociación Ibérica de Fotocatálisis. Costos de Edificios que aplican Fotocatálisis.	62

INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1-1. Aplicaciones de la fotocatalisis TiO ₂	12
Figura 2-1. Superficie Fotocatalítica	15
Figura 2-2. Procesos de destoxificación solar por vía fotocatalítica.	17
Figura 2-3 Nanopartículas de Dióxido de Titanio	18
Figura 3-1. Probetas adicionadas con rodamina B y dióxido de titanio	24
Figura 3-2 Montaje óptico para la medición de la degradación de Rodamina B	25
Figura 3-3 Resultado obtenido de la evaluación del efecto de la radiación	31
Figura 3-4 Muestra preparada para la medición de degradación de NO _x	35
Figura 3-5. Equipo experimental para la medición de degradación de NO _x	36
Figura 3-6. Montaje experimental para la medición de la degradación de NO _x	37
Figura 3-7. Lámpara OSRAM Vitalux y fotoreactor.	37
Figura 4-1. Ejemplos de infraestructuras construidas con fachadas de hormigón	41
Figura 4-2. Efecto de la Fotocatalisis con TiO ₂	42
Figura 4-3. Cerámica exterior Fotocatalítica	43
Figura 4-4 Pinturas fotocatalíticas con ligantes	44
Figura 4-5. Vidrio incoloro con adición fotocatalítico	47

INDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Los factores escogidos	24
Tabla 3-2. Cantidades (micromoles) de NO y NO _x , eliminados y de N ₂ O formado	39
Tabla 3-3. Resumen de los resultados obtenidos, según ISO 22197-1	41
Tabla 5-1. Análisis de precio unitario cerámica estándar	50
Tabla 5-2. Análisis de precio unitario cerámica fotocatalítica	50
Tabla 5-3. Análisis de costos en artículos de aseo para cerámica estándar	51
Tabla 5-4. Análisis de costos en artículos de aseo para cerámica fotocatalítica	51
Tabla 5-5. Costos de personal de aseo	51
Tabla 5-6. Estudio económico para cerámica estándar	52
Tabla 5-7. Estudio económico para cerámica fotocatalítica	52

SOLO USO ACADÉMICO

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1. Espectro de la fuente UV	26
Gráfico 3.2. Tiempo de exposición UV a diferentes edades	27
Gráfico 3.3. Tiempo de exposición UV a diferentes edades de 65H a 28D	28
Gráfico 3.4. Tiempo de exposición UV a diferentes edades de 6SH a 280	28
Gráfico 3.5. Curvas de número de unidades formadoras de colonias	33
Gráfico 3.6. Curva típica de degradación de NO _x	39
Gráfico 5.1. Comparativo de costos entre cerámica estándar y otra fotocatalítica.	53

SOLO USO ACADÉMICO

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

La necesidad de cuidar y preservar el medio ambiente ha llevado a la industria de la construcción en especial, a buscar y desarrollar nuevos métodos para construir edificios ecológicos e incluso capaces de descontaminar el medio ambiente, de tal forma de ofrecer a la comunidad una mejora sustancial en la calidad de vida.

Hoy en día, en la tecnología de los nuevos materiales, se está desarrollando una nueva aplicación capaz de utilizar los principios de la fotocatalisis, incorporada en diversos productos, cuyas ventajas ofrecen una importante solución para el medio ambiente y a la vida diaria de las personas. La fotocatalisis es una reacción fotoquímica que utiliza la luz solar y artificial con el fin de degradar compuestos orgánicos nocivos como el NO_x, SO_x, CO₂, Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's) y bacterias.

El fotocatalizador más utilizado en estos materiales de construcción es el TiO₂ (dióxido de titanio) el cual presenta excelente actividad fotocatalítica al irradiarlo con luz ultravioleta. Actualmente, está presente en innumerables productos relacionados al mundo de la arquitectura y construcción, como la cerámica, el cemento, la pintura y el vidrio cuya finalidad es otorgar propiedades fotocatalíticas a estos y en cuyo tema se concentra esta investigación.

1.2. Alcances y Limitaciones

Los aspectos en los que se enfoca el presente trabajo de titulación, están orientados al estudio técnico de la fotocatalisis, en particular en aquella que usa el dióxido de titanio como semiconductor y cuya finalidad es aprovechar sus propiedades en los materiales de la construcción.

Sin embargo, esta memoria se limita al estudio teórico del tema, por lo tanto se entregan ensayos, demostraciones y resultados encontrados en la literatura al respecto, en términos económicos se contempla la realización de un análisis de costos como referencia para una futura implementación. Principalmente la realización de ensayos y sus respectivos análisis no son posibles al no contar con los laboratorios necesarios para esto, considerando además que en el país no se ha implementado un mercado para materiales fotocatalíticos, lo que ha dificultado la obtención de productos para desarrollar demostraciones de sus propiedades

Se realiza, a modo demostrativo, un ensayo con la finalidad de inducir una propiedad autolimpiante a un mortero de revestimiento, efecto que será medido de manera visual en condiciones ambiente. Por otra parte se entregará un estudio de costos

de esta aplicación, particularmente la propiedad bactericida, con la finalidad de estimar la viabilidad económica de reemplazar un material estándar por otro fotocatalítico, considerando como inversión el aumento de su precio y como ahorro los costos de mantención.

1.3. Objetivos Generales

Realizar el estudio de materiales de construcción fotocatalíticos, en el cual se abordarán temas cuya finalidad son explicar a la comunidad universitaria qué es la fotocatalisis y qué implicancias tiene como mejora en la calidad de vida, cómo se aplica ésta técnica en los materiales, además, un estudio de costos de la aplicación en la industria de la construcción.

1.3.1. Objetivos Específicos

- Describir la aplicación en materiales de construcción fotocatalíticos; exponer el mecanismo químico de la fotocatalisis.
- Clasificar y describir las propiedades de la fotocatalisis.
- Dar a conocer los ensayos y procesos de demostraciones con sus resultados para cada propiedad y normativa aplicable en el contexto internacional.
- Fomentar el estudio y el uso de la fotocatalisis aplicada a los materiales de la construcción.
- Estimar, a través de un análisis económico el costo de su aplicación.

1.4. Historia y Evolución de la Fotocatalisis

La fotocatalisis parte del principio natural de descontaminación de la propia naturaleza, se define como la aceleración de una fotoreacción producida por un catalizador, en otras palabras, es una reacción fotoquímica que convierte la energía solar en energía química en la superficie de un catalizador o sustrato. En el año 1967 los profesores Akira Fujishima y Kenichi Honda, descubren el comportamiento fotocatalítico del TiO_2 y publican su estudio en la revista Nature con el nombre "Electrochemical Phototysis of Water at a Semiconductor Electrode" Nature 238, 37 - 38 (07 de julio 1972).

Akira Fujishima, mientras trabajaba en su doctorado bajo la supervisión del profesor Kenichi Honda, descubrió el fenómeno de la descomposición del agua fotocatalítica cuando se expone un electrodo de dióxido de titanio a una luz intensa, más tarde fue llamado 'el efecto Honda-Fujishima'. El descubrimiento de las propiedades de auto-limpieza de dióxido de titanio por el grupo bajo su supervisión

inició una revolución en la cerámica, el vidrio, y otros materiales que hoy en día siguen desarrollándose.

Según indica la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis, en el año 1990 se descubre la fotodegradación de NO_x por TiO_2 y también sus propiedades antibacterianas y autolimpiante.

Cuatro años más tarde aparece en el mercado de la construcción la primera aplicación de la fotocatalisis, una cerámica que aplica esta propiedad con el fin de autolimpiarse además de ser fungicida y bactericida.

Con el tiempo se hizo necesario realizar estudios más profundos a los materiales utilizados en la construcción que aplican la fotocatalisis, lo que llevó al desarrollo de laboratorios especializados y normativa con la finalidad de demostrar las propiedades del TiO_2 en los distintos métodos de aplicación. Europa es en la actualidad quien lleva la delantera en este ámbito con el desarrollo de Asociaciones y Federaciones de fotocatalisis donde se agrupan las distintas empresas que desarrollan materiales fotocatalíticos cuya finalidad es establecer los objetivos de la industria

1.5. Materiales Fotocatalíticos

Existen una gran variedad de revestimientos con esta cualidad, se diseñaron con el fin de mejorar la calidad de vida de las personas, aliviando la condición del entorno que los rodea, a continuación se nombrarán algunos de ellos: pinturas, cerámicos, bloques de hormigón prefabricado, vidrios entre otros. El fin de estos productos es el mismo, revestimientos con actividad fotocatalítica, que permiten conseguir propiedades de auto limpieza, bactericida y purificador de aire.

Algunos ejemplos de estos son:

- Hormigones: Existe un hormigón arquitectónico hecho con un tipo de cemento especial (desarrollado por Italcementi), mejorado con dióxido de titanio que, mediante fotocatalisis acelera la oxidación natural o proceso de descomposición de algunos contaminantes emitidos desde autos (por ejemplo los óxidos de nitrógeno), transformándolos en nitratos y sulfatos. Los óxidos de nitrógeno se producen por la quema de combustible, por ejemplo en los motores de los autos. Estos óxidos pueden causar problemas de salud y ambientales.
- Pinturas: Bio-Nox es la última innovación desarrollada, se trata de una pintura que es autolimpiante y absorbe los óxidos de nitrógeno del ambiente (NO_x), transformándolos en nitratos inocuos que son arrastrados por la lluvia. Además de tener aplicación en los sectores anteriormente enunciados, este recubrimiento se puede aplicar en cerámica decorativa y en los ladrillos cerámicos klinker para fachadas de cara vista.

1.5.1. Ventajas materiales fotocatalíticos

Los revestimientos fotocatalíticos representan un paso adelante en las temo/ogías medioambientales:

- No sólo son productos limpios, sino que además limpian los ambientes contaminados.
- Destruyen la suciedad y evitan el crecimiento de microorganismos.
- Favorece al Medio Ambiente, presentando enormes beneficios para la salud de los usuarios.
- Una vez aplicado, su efecto es permanente.
- Ahorra costos de mantenimiento ya que las superficies fotocatalíticas se mantienen limpias muchos años.

En síntesis la fotocátalisis es un proceso eficiente y efectivo para purificación del agua y del aire, deodorización y desinfección al concentrarse en la eliminación y degradación de los compuestos y contaminantes de estos elementos, tal como se aprecia en la Figura 1-1.

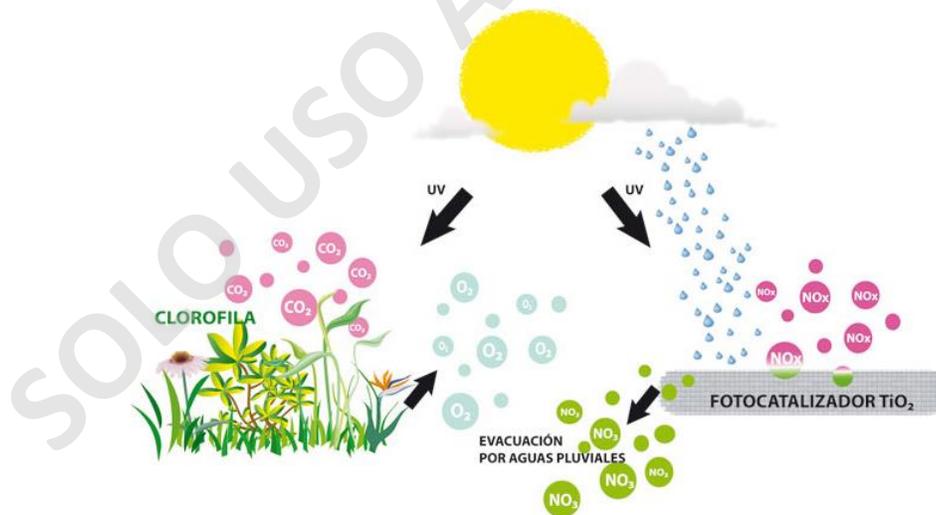


Figura 1-1. Aplicaciones de la fotocátalisis TiO₂

Fuente: <https://construinnova.net/2014/12/16/materiales-descontaminantes/>

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

La fotocatalisis parte de la necesidad de crear una manera limpia y segura de descontaminar el medio ambiente, utilizando la nanotecnología en sus aplicaciones, empleando más específicamente nanopartículas de ciertos minerales catalizadores como semiconductores que inducen un proceso de oxidación avanzada (POA) generando, con la ayuda de la energía solar, radicales hidroxilos con grandes propiedades de oxidación de compuestos orgánicos y contaminantes inorgánicos.

Investigaciones y estudios han determinado la existencia de numerosos semiconductores que pueden ser utilizados en los procesos de fotocatalisis, incluyendo TiO_2 ¹, WO_3 ², SiO_2 ³, ZnO ⁴, CdS ⁵ y ZnS ⁶. Sin embargo, el dióxido de titanio (TiO_2) es el fotocatalizador más apropiado debido a las ventajas que presenta sobre los demás semiconductores: es química y biológicamente inerte, es estable frente a la fotocorrosión y corrosión química, es altamente eficiente y su costo es bajo.

Óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, compuestos volátiles orgánicos son los elementos contaminantes que es capaz de degradar un material fotocatalítico en sus distintas aplicaciones arquitectónicas. Entre otras propiedades se pueden encontrar las de autolimpieza lo que otorga una gran solución y valor agregado a las alternativas que buscan aumentar la vida útil de los revestimientos de terminación de las fachadas arquitectónicas u otras, por otro lado se encuentra la propiedad bactericida lo que mejora, entre otras cosas, la salud de las personas al evitar el crecimiento de hongos y bacterias en zonas con demasiada humedad.

El TiO_2 se presenta en la naturaleza en varias formas esencialmente en la forma de anatasa y rutilo siendo una combinación de estos dos lo que genera la mejor característica fotocatalítica, cuyas proporciones se mencionarán más adelante con profundizar el proceso de fotocatalisis.

¹ Dióxido de Titanio

² Trióxido de Wolframio

³ Dióxido de Silicio

⁴ óxido de Zinc

⁵ Sulfuro de Cadmio

⁶ Sulfuro de Zinc.

2.2. Fotocatálisis. Aplicaciones y Propiedades

Se trata de materiales completamente atóxicos que, comparados con los revestimientos tradicionales, tienen excelentes propiedades al momento de:

- Eliminar la contaminación en el exterior e interior de los edificios.
- Eliminar los COVs procedentes de productos para el hogar, disolventes, fungicidas y combustión.
- Prevenir la aparición de moho o musgo.
- Evitar la suciedad en las paredes, actuar como desinfectante y desodorante de las habitaciones y locales.
- Esterilizar, destruyendo las bacterias presentes en el aire.
- Evitar la propagación de infecciones respiratorias.

2.2.1. Bactericida por Fotocatálisis

El proceso de fotocatálisis genera radicales hidroxilos, especie molecular altamente oxidante capaz de destruir la membrana celular perforándola. Producto de la diferencia osmótica, entre la membrana y el medio en que se encuentra, los lípidos de la célula percolan a través del agujero, lo que conlleva al fin de la vida del individuo celular.

También a través de la perforación, los radicales hidroxilos penetran en la célula, destruyendo una parte del espiral del ADN, evitando la replicación del individuo celular, lo cual elimina el total crecimiento de la población.

Simplemente con la luz UV, se puede esterilizar la bacteria, pero también pueden sobrevivir y ser reactivadas al ser irradiadas con la luz visible. La reacción fotocatalítica puede ser complementaria a la esterilización ultravioleta.

2.2.2. Autolimpieza por Fotocatálisis

La causa de la suciedad o de las manchas, es producto de los agentes químicos aceitosos, tales como las manchas de cigarrillos o los vahos de la cocina, los cuales se adhieren a las superficies. Estos ingredientes son todos compuestos orgánicos, por lo cual, se pueden descomponer por medio de la reacción fotocatalítica.

Los materiales fotocatalíticos poseen una característica conocida como propiedad súper hidrofílica, en la cual, las moléculas del agua presente en la humedad ambiental son atraídas hacia el semiconductor, este fenómeno es usado como la base para la propiedad de autolimpieza.

Al cubrir el sustrato con el revestimiento fotocatalítico, una película ultra fina (fotocatalítica) es formada en su superficie. Esta película ultra fina producto del agua en su aplicación, genera grupos hidroxilos sobre su superficie, el vapor de la atmósfera genera una película de agua sobre ésta y su efecto se muestra en la Figura 2-1.

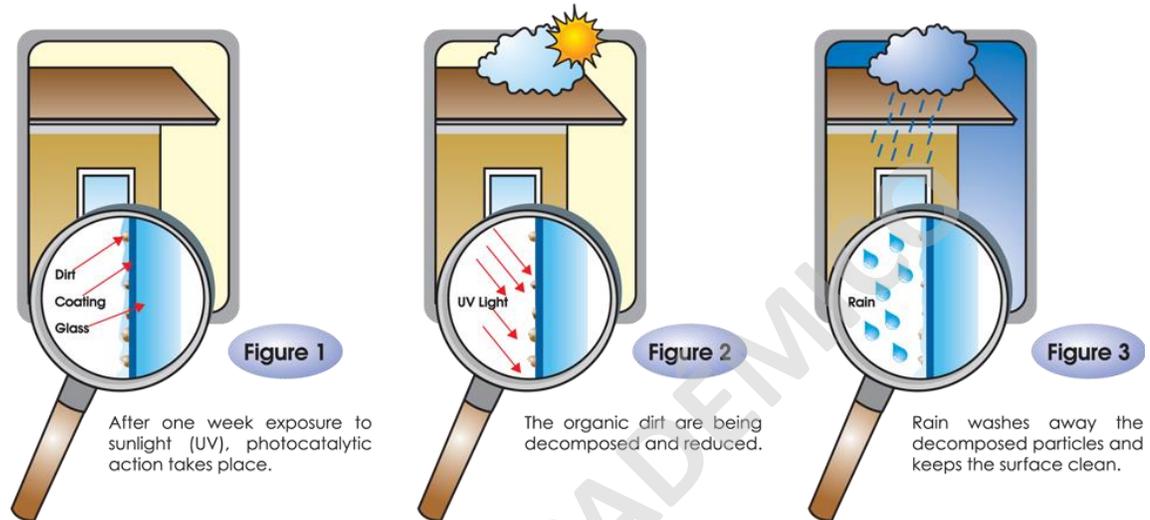


Figura 2-1. Superficie Fotocatalítica

(1) superficie fotocatalítica. (2) Superficie súper hidrofílica. 3) Mancha no adherida

Fuente: <http://fintelligentwalls.blogspot.com/2013/06/Ñidños-qu+se-limpian-soloslike-boss.html>

Por la película de agua generada sobre la superficie, las manchas que en otra ocasión se pegarían al sustrato, quedan flotando en esta, y entonces pueden ser lavadas por el agua de la lluvia o por la limpieza de agua a presión. De esta manera la superficie queda protegida de la presencia de manchas, es decir, de este modo se evita la adhesión de contaminantes a la superficie.

2.2.3. Descontaminante por Fotocatálisis

Por medio de la fotocatálisis se puede eliminar la mayor parte de los contaminantes presentes en las zonas urbanas: NO_x , SO_x , compuestos orgánicos volátiles (VOC's), CO, metil mercaptano, formaldehído, compuestos orgánicos clorados, compuestos poli aromáticos. Los materiales de construcción tratados con un fotocatalizador eliminan sobre todo las partículas NO_x que son producidas por los vehículos, la industria y la producción de energía. Los óxidos de nitrógeno (NO_x) están considerados como una de las contaminaciones más dañinas la salud humana. Los NO_x , además, aceleran el efecto invernadero y el calentamiento global.

Esta reacción química se genera por medio de un semiconductor que actúa como catalizador y que al absorber las radiaciones ultravioleta, produce una serie de radicales libres que se elevan como si fueran pompas de jabón, los cuales, al chocar con los óxidos

nitrosos se degradan y se produce una alteración química, pasando a ser nitratos no nocivos para el ser humano. Para que se produzca esa reacción química, el catalizador debe recibir cierta cantidad de luz y de humedad. Al utilizar la energía lumínica, el agua y el oxígeno del aire, los fotocatalizadores hacen que se formen moléculas muy reactivas, capaces de descomponer por oxidación/reducción determinadas sustancias orgánicas e inorgánicas que están presentes en la atmósfera.

2.3. Fotocatálisis. Mecanismo de Acción

Tal como se describió de manera general en capítulo de introducción, la fotocatalisis es un proceso químico, a través del cual se busca acelerar el proceso de fotoreacción en presencia de un semiconductor como el dióxido de titanio (TiO_2) y cuya fuente de energía son los rayos ultravioletas de la luz solar (UV). De otra forma este proceso sería muy lento, por ello cobra importancia la utilización de catalizadores, además se puede utilizar la luz artificial como fuente de energía. En presencia de humedad, de aire y de luz se activa un fuerte proceso oxidativo conocido como proceso de oxidación avanzada (POA) que genera la descomposición de los contaminantes orgánicos que entran en contacto con estas superficies. Su funcionamiento imita la fotosíntesis. El proceso químico que subyace en realidad es una oxidación puesta en marcha gracias a la acción combinada de la luz (solar o artificial) y la humedad en el aire. Este proceso ha sido importante materia de estudio debido a que es posible emplear su aplicación en la purificación del aire y del agua, y en propiedades que generan superficies autolimpiantes y bactericidas.

Los dos elementos (luz y el aire), en contacto con el recubrimiento de superficie, de hecho, favorecen la activación de la reacción y la consiguiente descomposición de las sustancias orgánicas e inorgánicas (equivalente a todo el polvo fino PM 2,5 — PM 10), de microbios, de los óxidos de nitrógeno, compuestos aromáticos policondensados, benceno, dióxido de azufre, monóxido de carbono, formaldehído, metanol, etanol, benceno, etilbenceno, de monóxido de carbono y de dióxido de nitrógeno.

Existen dos tipos de fotocatalisis: 'la homogénea y 'la heterogénea:

- La fotocatalisis homogénea se caracteriza porque el catalizador se disuelve en el medio en el cual se encuentra, lo que significa que este catalizador se encuentra en toda la masa del medio.
- La fotocatalisis heterogénea es un proceso catalítico que se basa en la absorción de energía radiante, bien sea ultravioleta o visible, por un sólido, que generalmente es un semiconductor de banda ancha. La excitación del semiconductor tiene lugar de dos formas; la primera, es por excitación directa del semiconductor, absorbiendo éste los fotones que se van a gastar en el proceso; y la segunda, por excitación de las moléculas absorbidas en la superficie del catalizador, las cuales son capaces de transmitir los electrones al semiconductor.

Los mecanismos de degradación de la fotocatalisis heterogénea que han sido propuestos para algunos compuestos orgánicos contaminantes son: por ataque de radicales hidroxilo (OH) (Turchi y Ollis, 1990; Cabrera et al., 1997) o por ataque de huecos generados por la radiación UV en la superficie del semiconductor (Chemseddine y Boehm 1990; Zalazar et al., 2005). En cambio, otros estudios proponen ambos mecanismos simultáneos o, dependiendo de las condiciones de reacción, uno u otro.

En general, las reacciones de oxidación o reducción de los contaminantes se verifican en la región interfacial comprendida entre el sólido excitado y la solución. El semiconductor puede ser excitado directamente cuando absorbe los fotones usados en el proceso, o indirectamente cuando moléculas adsorbidas en la superficie del catalizador, excitadas con los fotones del proceso, inyectan electrones en la banda de valencia del semiconductor. La Figura 2-2 muestra un esquema de los procesos químicos que ocurren en una partícula de semiconductor cuando es excitada con un fotón de energía $h\nu^7$ igual o mayor que el E_g^8 (banda prohibida) del semiconductor.

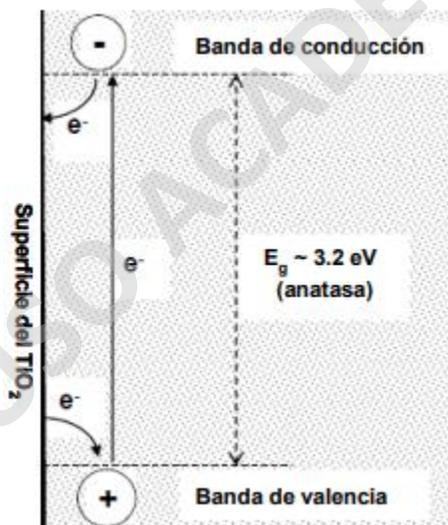


Figura 2-2. Procesos de destoxificación solar por vía fotocatalítica. Representación esquemática de una partícula del fotocatalizador.

Fuente:http://www.aparejadoresmadrid.es/archivos/jornadaes/15/descontaminaci%C3%B3n_del_aire_en_ciudades.pdf

⁷ $h\nu$: energía asociada a un fotón, donde h es la constante de Planck y la letra griega ν es la frecuencia de la onda de la partícula

⁸ E_g : Diferencia de energía entre la banda de conducción y la banda de valencia

2.3.1. Dióxido de Titanio

Existe una gran variedad de materiales con la capacidad de actuar como catalizadores y llevar a cabo reacciones fotosensibilizadas, como por ejemplo: TiO_2 , ZnO , CdS , WO_3 , ZnS , etc. Estos materiales en su mayoría pueden ser excitados con luz de no muy alta energía, lo cual incrementa el interés para su aplicación utilizando directamente luz solar. De los fotocatalizadores utilizados, los más estudiados son los óxidos metálicos semiconductores de E_g (banda de energía prohibida) elevado, específicamente TiO_2 (Figura 2-3), el cual presenta una gran estabilidad química en un amplio rango de pH.



Figura 2-3 Nanopartículas de Dióxido de Titanio

Fuente: <http://es.materfad.com/material/228/oxido-de-titanio>

El TiO_2 se usa como pigmento blanco por sus propiedades de dispersión, su estabilidad química y su supuesta no toxicidad, siendo el pigmento inorgánico más importante en términos de producción mundial.

El dióxido de titanio es un semiconductor utilizado en fotocátalisis para oxidación de compuestos orgánicos volátiles del aire o el agua debido a su alta estabilidad, actividad fotocatalítica, capacidad para la oxidación avanzada y bajo costo en comparación a otros catalizadores. El TiO_2 es un óxido de marcado carácter iónico, formado básicamente por iones Ti^{4+} y O^{2-} en variadas formas alotrópicas en fase cristalina como el rutilo (tetragonal), la anatasa (octahédrico) y la broquita (ortorrómbico). No obstante, la anatasa es la fase más usada en la fotocátalisis heterogénea. Por dicha razón, es importante controlar la transición de fases en el dióxido de titanio. Se ha reportado que la fase rutilo es más estable en tamaño microscópico, mientras que la estructura de la anatasa es termodinámicamente más estable cuando el

tamaño de cristal es menor a 14 nm. Se ha llegado a la conclusión que las nanopartículas amorfas del titanio se transforman en anatasa, una vez que el cristal posee un tamaño superior a 2.5-3 nm.

El mineral ilmenita (FeTiO_3) es la fuente comercial más importante de titanio. La anatasa es una de las formas minerales del óxido de titanio. Cuando se calienta por encima de 9150 C se transforma en rutilo, la otra forma mineral de TiO_2 . Existen importantes diferencias físicas entre ambas especies: la anatasa no es tan dura y es menos densa que el rutilo, y su brillo es más adamantino. La ilmenita posee 43-61% de TiO_2 y entre 34-49% de óxido de hierro (la encontramos en forma de arena, de fácil procesamiento); el rutilo se extrae de arenas de río, que contienen 90-98% de rutilo (el rutilo sintético se obtiene a partir de la ilmenita); la anatasa contiene 30-40% de TiO_2

Su propiedad como fotocatalizador, es reconocida por la refinación y cristalización de un mineral de hierro de titanio conocido como mineral de anatasa. Un fotocatalizador es una sustancia que activa o acelera una reacción química cuando es expuesta a la luz, sin experimentar ningún cambio en su estructura física. De todos los semiconductores que pueden actuar como sensibilizadores en procesos de óxido-reducción mediados por luz, el dióxido de titanio es el más estudiado debido a:

- Su naturaleza no tóxica.
- Bajo costo.
- Insolubilidad en agua.
- Fotoestabilidad.
- Estabilidad química en un amplio intervalo de pH.
- Alto valor de E_g en sus distintas formas.
- Huecos catiónicos altamente oxidantes.
- Gran actividad para la formación de radicales hidroxilos HO^\cdot

El dióxido de titanio, específicamente cuando se expone a la luz, emite oxígeno y radicales hidroxilos, en un proceso que se llama oxidación. Durante esta reacción, el dióxido de titanio, emite oxígeno y radicales del oxidrilo, los cuales enlazan con las sustancias dañinas en el aire para producir compuestos inofensivos tales como H_2O y CO_2 . Debido a que el proceso de oxidación es permanente, el dióxido de titanio puede tener efectos antibacteriales en una variedad de usos.

2.4. Normativa Aplicable

Existen normas internacionales para determinar la efectividad de materiales que contengan un fotocatalizador, como de igual manera hay determinados países que han

diseñado normas internas, que de igual forma buscan el mismo objetivo, a continuación se nombraran algunas de estas:

2.4.1. Anticontaminante

- ISO 22197-1: 2007: Cerámicas técnicas (cerámicas avanzadas, cerámicas técnicas avanzadas). Métodos de ensayo relativos al funcionamiento de materiales fotocatalíticos semiconductores para la purificación del aire. Parte 1: Eliminación del óxido nítrico.
Repartición: ISO, Ginebra, 2007.

Breve alcance: Especifica un método de ensayo para la determinación de la actuación de purificación de aire de materiales que contienen un fotocatalizador o tienen películas fotocatalíticas en la superficie, por lo general hechas de semiconductores de óxidos metálicos, tales como dióxido de titanio u otros materiales cerámicos, a través exposición continua de una muestra sometida a un contaminante de aire bajo iluminación con luz ultravioleta.

- ISO 22197 -1: 2007 está diseñada para su uso con diferentes tipos de materiales, tales como materiales de construcción en hoja plana, tablero o forma de placa, que son las formas básicas de los materiales para diversas aplicaciones. ISO 22197 -1: 2007 también se aplica a los materiales en forma de panal de abeja, y de los materiales de plástico o papel si contienen microcristales de cerámica y materiales compuestos. ISO 22197 -1: 2007 no se aplica a polvo o materiales fotocatalíticos granulares.

Este método de prueba es generalmente aplicable a los materiales fotocatalíticos producidos para la purificación del aire. Este método no es adecuado para la determinación de otros atributos de rendimiento de los materiales fotocatalíticos, es decir, la descomposición de los contaminantes del agua, de auto-limpieza, antivaho y acciones antibacterianas. Se refiere a la eliminación de óxido nítrico.

2.4.2. Bactericida

- ISO 27447: 2009: Cerámicas técnicas (cerámicas avanzadas, cerámicas técnicas avanzadas) - Método de ensayo para la actividad antibacteriana de materiales fotocatalíticos semiconductores.
Repartición: ISO, Ginebra, 2009.

Breve alcance: Especifica un método de ensayo para la determinación de la actividad antibacteriana de los materiales que contienen un fotocatalizador o tienen películas fotocatalíticas en la superficie, mediante la medición de la enumeración de las bacterias bajo irradiación de luz ultravioleta.

- ISO 27447: 2009 es para uso con diferentes tipos de materiales semiconductores fotocatalíticos utilizados en materiales de construcción, en hoja plana, tablero, forma de placa o textiles que son las formas básicas de los materiales para diversas aplicaciones. No incluye polvo, gránulos o materiales fotocatalíticos porosos.

Este método de ensayo es generalmente aplicable a los materiales fotocatalíticos producidos para un efecto antibacteriano. Otros tipos de comportamiento de los materiales fotocatalíticos, es decir, la descomposición de los contaminantes del agua, autolimpiantes, antiniebla y purificación de aire, no están determinados por este método.

Los valores expresados en la norma ISO 27447: 2009 están de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

2.4.3. Autolimpiante

- ISO 27448: 2009: Cerámicas técnicas (cerámicas avanzadas, cerámicas técnicas avanzadas) - Método de ensayo para el desempeño de auto-limpieza de materiales fotocatalíticos semiconductores. - Medición del ángulo de contacto del agua. Repartición: ISO, Ginebra, 2009.

Breve alcance: Especifica un método de ensayo para la determinación de la actuación de autolimpieza de materiales que contienen un fotocatalizador o tienen películas fotocatalíticas sobre la superficie, y que por lo general están hechos de semiconductores óxidos metálicos tales como dióxido de titanio.

Este método se utiliza para medir el ángulo de contacto de agua bajo iluminación con luz ultravioleta, que es uno de los índices que influyen en el rendimiento de auto-limpieza de los materiales fotocatalíticos

- ISO 27448: 2009 no incluye sustratos permeables al agua, superficies rugosas que no han expuesto las gotas de agua, altamente hidrofóbicos, polvo o materiales granulares, o fotocatalizadores sensibles a la luz visible.
- ISO 10677: 2011: Cerámica fina, cerámicas técnicas avanzadas - La luz ultravioleta fuente para probar semiconductores materiales fotocatalíticos. Repartición: ISO, Ginebra, 2011.

Breve Alcance: Describe un ultravioleta (UV) fuente de luz y especifica un método de medición de la intensidad de radiación que se utiliza en probar el rendimiento de los materiales semiconductores fotocatalíticos en un laboratorio.

CAPÍTULO 3

MÉTODOS DE ENSAYO Y DEMOSTRACIONES DE LAS PROPIEDADES DE LA FOTOCATÁLISIS

3.1. Introducción

En este capítulo se mostrarán tipos de ensayos que se utilizan para demostrar las propiedades fotocatalíticas, para aplicaciones dentro del campo de la construcción, estas, lo que buscan es demostrar de una manera fácil y repetible, para que en cualquier laboratorio que cuente con los equipos adecuados se puedan replicar y obtener resultados similares, si se corroboran las propiedades dentro del campo de la construcción teniendo como ejemplo los siguientes ensayos:

- Ensayo para determinar la propiedad "BACTERICIDA POR FOTOCATÁLISIS". En este punto lo que se busca es determinar mediante una placa Petri, cuantificar la eliminación de una bacteria un hongo, esto se logra incorporando una sepa determinada en distintas probetas, dejando una como probeta de patrón, con la que se comparan las demás en un periodo de cultivo.
- Ensayo para determinar la propiedad "AUTOLIMPIEZA POR FOTOCATÁLISIS". En este ensayo se busca determinar la eficiencia de la fotocatalisis al reducir una mancha de rodamina B, la cual es incorporada en probetas que contienen un fotocatalizador y dejando una de estas muestras solo con rodamina B como muestra patrón, estas muestras se exponen a luz ultravioleta UVA por determinados periodos de edades y se comparan con la muestra patrón.
- Ensayo para determinar la propiedad "ANTICONTAMINANTE POR FOTOCATÁLISIS". En este ensayo se prepara una muestra que contenga un fotocatalizador, el cual se incorpora en un reactor, que está conectado a un circuito por el que se incorpora un gas contaminante como puede ser CO₂, NO_x, VOC's, se toma la medida de contaminante al comienzo y se compara con la medida de la salida, la muestra que está contenida en el reactor es irradiada con luz ultravioleta UVA, el gas en este punto se degrada gracias a la muestra, con esto se logra una disminución del agente contaminante y se determina la efectividad del fotocatalizador.

Mediante lo expuesto en los puntos anteriores, lo que se busca es determinar la eficiencia de la fotocatalisis en materiales de la construcción mediante ensayos, los cuales fueron obtenidos de Informes Técnicos de ensayos solicitados por empresas dedicadas a la producción de materiales con propiedades fotocatalíticas y de investigaciones realizadas por universidades externas y que basan sus estudios en las normas contenidas en el

capítulo anterior para cada propiedad en particular, es decir, bactericida, autolimpiante y descontaminante del aire.

3.2. Ensayo Autolimpieza

Otro de los colorantes más usados para determinar la actividad fotocatalítica de los materiales es la Rodamina B, un colorante rojo orgánico. Su degradación indica la actividad fotocatalítica de los materiales y puede ser fácilmente seguida mediante espectrofotometría. En la literatura se encuentran estudios de la degradación de Rodamina B en pastas y morteros de cemento, para lo cual es muy adecuado pues a diferencia del azul de Metileno, es resistente a la luz visible y no es soluble en medios alcalinos.

Usualmente, para la determinación de la degradación de la Rodamina B, así como de otros colorantes y pigmentos, se emplean diferentes sistemas de medición del color. Cada uno de los métodos utilizados y reconocidos internacionalmente tiene su propio sistema numérico de evaluación de color. Sin embargo, el sistema más utilizado en la industria del cemento y de materiales para la construcción es el desarrollado por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE), más específicamente el modelo CIE donde las coordenadas colorimétricas están definidas por L^* , a^* y b^* . La coordenada L^* representa la luminosidad, es decir que tan claro u oscuro es el material que se está midiendo. La coordenada a^* representa la tendencia del material a tener tonalidad roja (a^* positivo) o verde (a^* negativo) y la coordenada b^* representa la tendencia a tonalidad amarilla (b^* positivo) o azul (b^* negativo).

Los valores L^* , y se calculan a partir de los valores triestímulos (X, Y, Z) que son la base de todos los modelos matemáticos de color.

Preparación

Las probetas conformadas para realizar las mediciones de actividad fotocatalítica consistieron en discos de pasta de cemento de 2,8 cm de diámetro y 0,5 cm de espesor (Figura 3-1). Las pastas de cemento se prepararon con una relación en peso agua/cemento de 0,5. El agua empleada se mezcló con Rodamina B en una concentración de 0,5 g/L así como el dispersante polimérico (19% en peso respecto a las nanopartículas adicionadas) y las nanopartículas de TiO_2 . Dicha solución acuosa fue mezclada en un agitador de alta cizalla Heidolph DiAx 900.

La Rodamina B se adicionó al agua con la que se preparó la pasta para lograr una mejor homogeneización del color sobre la totalidad de la probeta, contrario a lo recomendado por la norma italiana UNI 11259-2008 donde la Rodamina B sólo se adiciona a la superficie de la muestra generando zonas coloreadas más intensamente que otras.



Figura 3-1. Probetas adicionadas con rodamina B y dióxido de titanio dejando una como muestra patrón, para ser expuestas a distintas edades de radiación UV.

Fuente: Evaluación de las Propiedades Físicas y Fotocatalíticas de Cemento adicionado con nanopartículas de Dióxido de Titanio. C. Cárdenas Ramírez, Universidad Nacional de Colombia

El problema de investigación planteado en este trabajo involucra varios factores que es necesario investigar de forma simultánea para observar su influencia sobre las variables respuesta escogida pues no es clara cuál es la importancia de cada uno y de sus interacciones sobre dicha variable respuesta. Debido a esta situación se hace necesario emplear una metodología de diseño de experimentos en donde se asegure la mejor forma posible de realizar los ensayos. Se plantea entonces el uso de un diseño factorial completo 4x3 (Tabla 3-1), con dos bloques, correspondientes a dos edades de medida elegidos (65 horas y 28 días) y manteniendo el tipo de cemento (cemento blanco TIPO IM) constante.

Tabla 3-1. Los factores escogidos, así como sus niveles, se presentan en la Tabla.

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
% Adición* TiO ₂	0	0,5	1,0	3,0
Anatasa:Rutilo	100:0	85:15	50:50	-

*porcentaje en peso respecto al cemento

Fuente: Evaluación de las Propiedades Físicas y Fotocatalíticas de Cemento adicionado con nanopartículas de Dióxido de Titanio. C. Cárdenas Ramírez, Universidad Nacional de Colombia

Montaje Experimental

Para la medición de la degradación de la Rodamina B se realizó un montaje óptico experimental diseñado en el laboratorio para tal fin como se muestra en la Figura 3-2. El montaje consiste en una fuente de radiación UV (320 nm - 420 nm), un difusor, dos

lentes de Fresnel (una de ellas actúa como colimador) y un portamuestras. EL espectro de la fuente IJV fue caracterizado con un espectrofotómetro Ocean Optics PC2000, tanto antes de las lentes como en el punto donde se ubicaron las muestras a ser medidas.

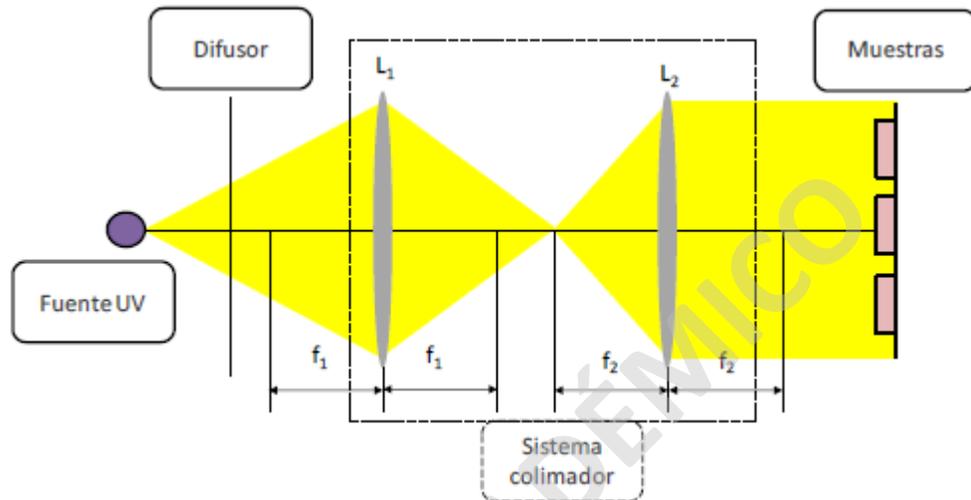


Figura 3-2 Montaje óptico para la medición de la degradación de Rodamina B

Fuente: Evaluación de las Propiedades Físicas y Fotocatalíticas de Cemento adicionado nanopartículas de Dióxido de Titanio. C. Cárdenas Ramírez, Universidad Nacional de Colombia

El colimador consiste en una lente de Fresnel, que gracias a su geometría plana convexa, su gran apertura y su corta distancia focal es apropiada para direccionar los haces de la fuente UV hacia las probetas. La potencia de la radiación UV en el lugar donde están las muestras es de 1.18 WIm^2

Caracterización de la Fuente

El Gráfico 3.1 presenta el espectro de la fuente de radiación ultravioleta empleada en el montaje experimental antes y después de las lentes de Fresnel. Los espectros muestran que las lentes funcionan como filtros para la radiación con longitudes de onda menores de 370 nm. Ya que la energía necesaria para excitar las fases anatasa y rutilo corresponde a una longitud de onda de 387,5 nm y 413 nm, respectivamente, entonces este cambio en el espectro no implica mayores inconvenientes en la degradación de la Rodamina B mediante fotocatalisis.

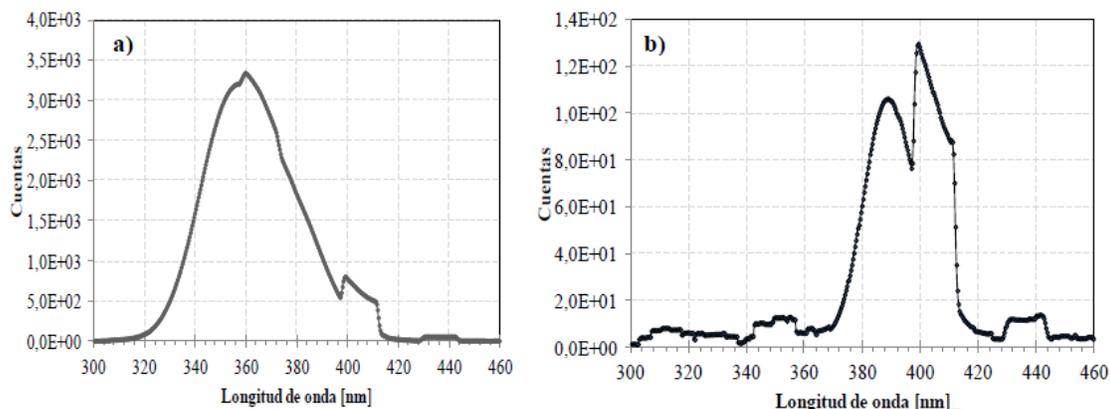


Gráfico 3.1. Espectro de la fuente UV a) antes de pasar por las lentes de Fresnel y b) luego de pasar por las lentes de Fresnel

Fuente: Evaluación de las Propiedades Físicas y Fotocatalíticas de Cemento adicionado con nanopartículas de Dióxido de Titanio. C. Cárdenas Ramírez, Universidad Nacional de Colombia

Resultados de las medidas de degradación de la Rodamina B

El proceso de degradación de colorantes (azul de metileno, verde de metilo, naranja ácido o Rodamina B) como una medida de la eficiencia fotocatalítica de materiales semiconductores es aún objeto de discusión en la comunidad científica ya que estas sustancias presentan, en cierta medida, una baja resistencia a la luz ultravioleta. Sin embargo, este proceso se emplea usualmente como método de prueba de actividad fotocatalítica, en parte porque la degradación de los colorantes bajo radiación UV se puede seguir fácilmente mediante espectrofotometría o espectroscopia. Para este trabajo se eligió la Rodamina B porque es altamente soluble en agua, tiene baja sensibilidad a la alcalinidad de los materiales cementicios y su estructura química consiste en un hidrocarburo aromático policíclico, estructura típica de algunos contaminantes hallados en los ambientes urbanos.

Las probetas evaluadas en esta sección presentaron coloración rosada al principio del ensayo por la presencia de la Rodamina B en la formulación. Después de la exposición continua durante 6 horas a radiación UV (1,18 W/m²) presentaron un blanqueamiento debido a la degradación del colorante orgánico Rodamina B. Las probetas patrón, sin adición de TiO₂ pero preparadas igualmente con Rodamina B, presentaron igualmente cambios en el color muy probablemente debido a la interacción directa entre el colorante y la radiación. Sin embargo esta degradación fue a una velocidad mucho más lenta que la degradación fotocatalítica. Por este motivo, los análisis realizados de los resultados obtenidos de la prueba fueron comparados con los resultados que presentaron las probetas patrón sin adición de TiO₂, con el fin de evitar interpretaciones erradas de la eficiencia catalítica de las probetas con TiO₂.

Los resultados presentados en los Gráficos 3.2, 3.3 y 3.4 muestran el cambio en el color de las coordenadas a^* , b^* y L^* a través del tiempo para las diferentes relaciones anatasa: rutilo (AR) estudiadas, incluyendo la probeta patrón sin adición de TiO_2 . Los tiempos considerados fueron 65 horas y 28 días. El valor de a^* indica una tonalidad entre los colores rojo (valores positivos) y verde (valores negativos). Así mismo, valores positivos de b^* indican coloraciones amarillas y valores negativos, azules; la coordenada L^* indica la luminosidad, correspondiendo al negro y al blanco.

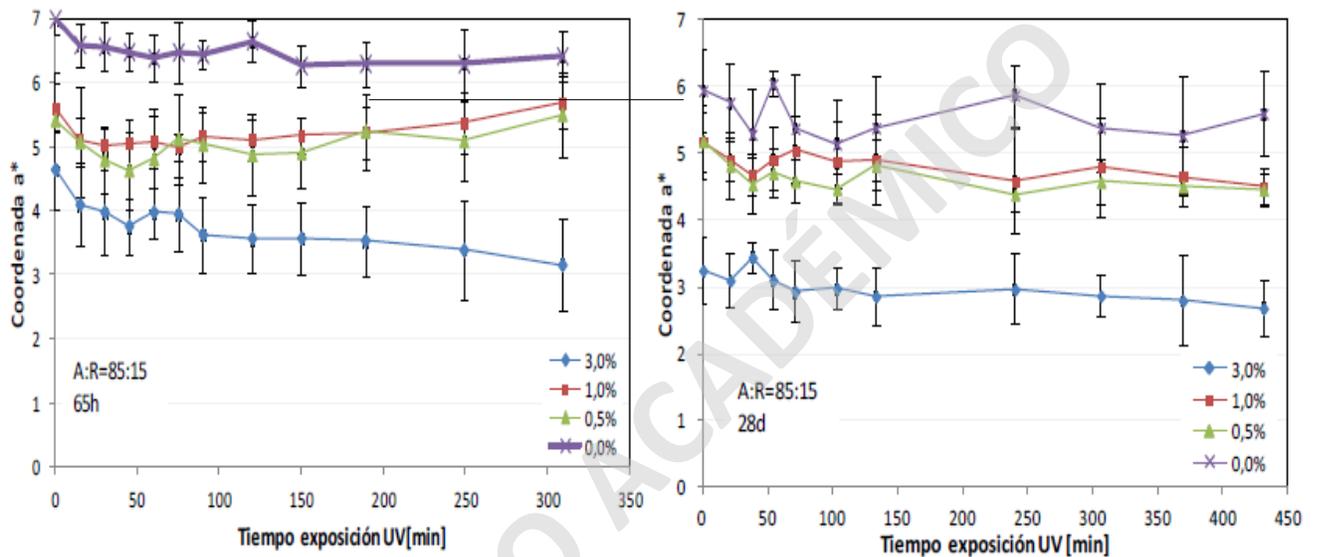


Gráfico 3.2 Tiempo de exposición UV a diferentes edades de 65 H a 28 D

Fuente: Evaluación de las Propiedades Físicas y Fotocatalíticas de Cemento adicionado con nanopartículas de Dióxido de Titanio C. Cárdenas Ramírez, Universidad Nacional de Colombia

Todas las muestras patrón, con 0% de TiO_2 , presentaron los mayores valores de a^* indicando una coloración más roja, durante todo el tiempo de medición, tanto a 65 horas como a 28 días. Las muestras con el menor valor en la coordenada de a^* fueron aquellas con el 3% de adición de TiO_2 , incluso desde el tiempo inicial de medición. Esto es entendible pues el dióxido de titanio actúa como un pigmento y al ser adicionado a las probetas de cemento puede cambiar sus coordenadas. Los cambios en las coordenadas b^* y L^* no fueron tan notorias entre las diferentes pastillas, debido a que la Rodamina B tiene una coloración rojiza predominante.

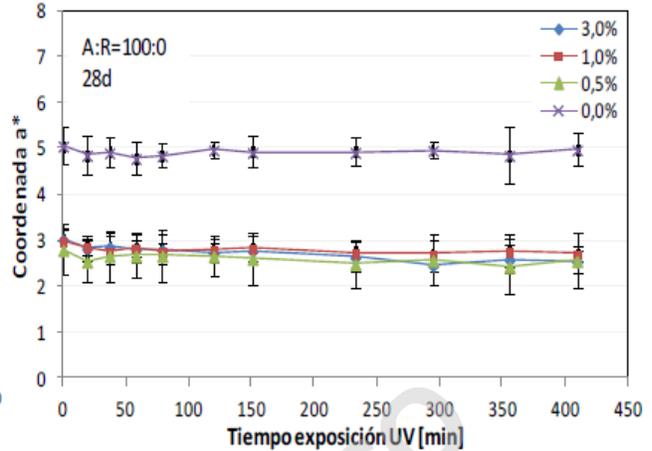
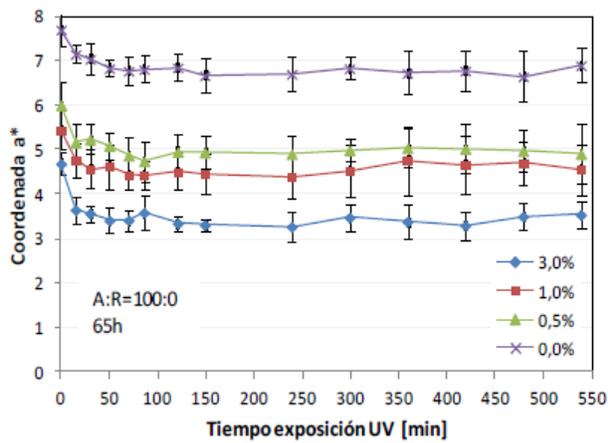


Gráfico 3.3. Tiempo de exposición UV a diferentes edades de 65H a 28D

Fuente: Evaluación de las Propiedades Físicas y Fotocatalíticas de Cemento adicionado con nanopartículas de Dióxido de Titanio. C. Cárdenas Ramírez, Universidad Nacional de Colombia

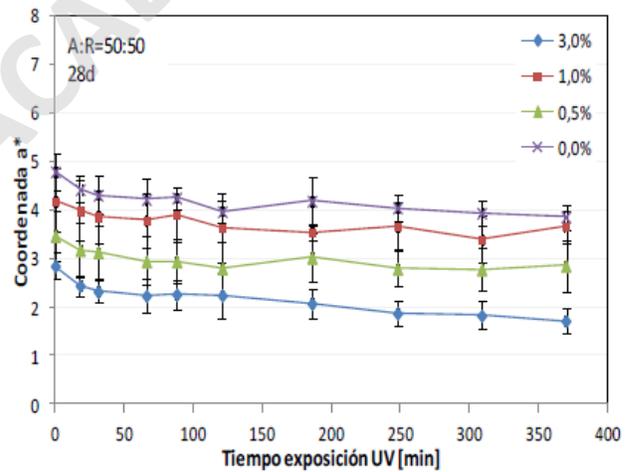
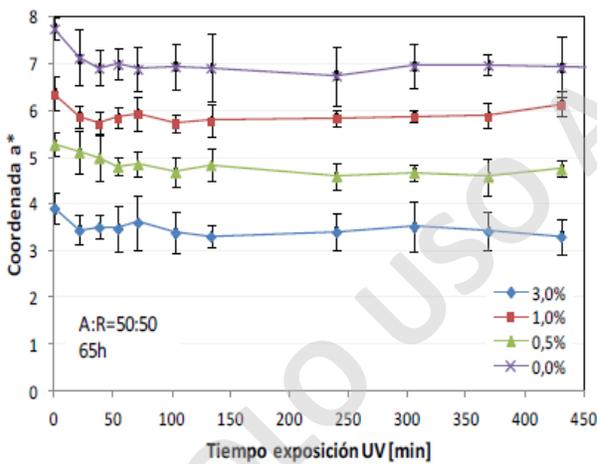


Gráfico 3.4. Tiempo de exposición UV a diferentes edades de 65H a 28D

Fuente: Evaluación de las Propiedades Físicas y Fotocatalíticas de Cemento adicionado con nanopartículas de Dióxido de Titanio. C. Cárdenas Ramirez, Universidad Nacional de Colombia

Se observa que el mayor cambio en el color se presentó para las muestras con el 3% de adición de TiO_2 , especialmente para una proporción anatasa:rutilo de 85.15, seguidas por las muestras que contenían 3% con una relación de 100:0. A los 28 días se observa una disminución en la magnitud del cambio de color para todas las muestras,

excepto para aquellas con 50:50 de anatasa - rutilo. Las muestras de control también presentaron cambios en el color, asociados a la degradación del colorante por acción de la radiación UV

Según estos resultados, se puede observar que a 65 horas, las probetas con una proporción A.R de 100:0 y una adición de 3% de TiO₂ en la matriz cementicia son las que presentan una mayor eficiencia fotocatalítica, seguida por las probetas con un 3% de TiO₂ y una relación de A:R de 85:15. Sin embargo ambos valores están muy cercanos. Las probetas con adiciones de 0,5% y 1% de TiO₂ para las relaciones A:R 85:15 y 50:50 mostraron poca actividad fotocatalítica.

A edades tardías se observa un incremento en los coeficientes de las probetas con porcentajes de TiO₂ menores de 3% para las relaciones A:R 85:15 y 50:50, respecto a los resultados obtenidos a las 65 horas. Las probetas con una relación A:R 50:50 y un 3% de TiO₂ presentan un incremento considerable respecto a las demás probetas. Esto podría explicarse por el efecto de la sinergia entre las fases anatasa y rutilo del TiO₂ que conlleva a una disminución de la velocidad de recombinación de los pares electrón-hueco formados en el semiconductor, permitiendo un tiempo más prolongado para generar los radicales reactivos que degradan finalmente el colorante orgánico, o cualquier otro compuesto orgánico adsorbido en el catalizador.

La actividad fotocatalítica es influenciada por el tiempo de curado de las pastas de cemento, notándose una disminución en la actividad catalítica de todas las probetas a unas edades de 28 días. Algunos autores han estudiado la influencia del envejecimiento de materiales cementicios en la actividad fotocatalítica, concluyendo que la carbonatación de los cementos adicionados con TiO₂ conlleva a una pérdida muy pronunciada en la eficiencia catalítica luego de varios meses.

3.3. Ensayo Bactericida

Para el presente ensayo (Inactivación bacteriana por el efecto de nanopartículas de TiO₂ amorfo, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia), se demostró la inactivación bacteriana de una cepa de *Escherichia coli*, a través de curvas de letalidad. El método de sol-gel⁹ para sintetizar el dióxido de titanio se utilizó con la finalidad de obtener éste en fase amorfa (anatasa). Luego se cultivó una colonia de cepas de *Escherichia coli* sobre la cual se activó el TiO₂ con el propósito de disminuir la población bacteriana y plasmar los resultados de los ensayos.

⁹ Método Sol-Gel. El proceso sol-gel permite la fabricación de materiales amorfos y policristalinos con características especiales en su composición y propiedades. El sol-gel es una ruta química que inicia con la síntesis de una suspensión coloidal de partículas sólidas o cúmulos en un líquido (sol) y la hidrólisis y condensación de éste sol para formar un material sólido lleno de solvente (gel).

Inactivación Bacteriana

24 horas previas a la prueba de microdilución se realizó la resiembra de las cepas de *Escherichia coli* en caldo Mueller Hinton, tomándose de tres a cinco colonias bien aisladas, de tamaño y morfología similar. Este sistema se incubó por espacio de 12 horas a una temperatura de 37⁰C, en agitación constante, hasta alcanzar una turbiedad equivalente a la del tubo N^o 0,5 de la escala de McFarland. Para determinar la inactivación bacteriana del TiO₂ amorfo sobre cepas de *E. coli*, ésta se realizó mediante curvas de letalidad y para ello se consideró el efecto del tiempo de contacto de las bacterias con el TiO₂ previamente activado exponiendo el material, durante 1 hora, a la acción de la radiación UV.

Ensayo de Viabilidad Celular de la Cepa de *Escherichia coli*

Para la realización de este ensayo se utilizó el TiO₂ amorfo, sintetizado mediante el método sol-gel. La fase amorfa del TiO₂ presentó una superficie específica de 17.445±0 03 m²/g y un tamaño de partícula primario de —100 nm. Para determinar el efecto de la actividad fotocatalítica de este TiO₂, sobre el crecimiento bacteriano, el dióxido de titanio fue sometido a la acción de radiación UV, durante 1 hora, colocándolo sobre el agitador orbital que se encontraba dentro de una cabina de flujo laminar la cual tenía en su parte superior, las lámparas de UV (λ-254 nm). La intensidad de la luz, que alcanzaba la superficie de la suspensión de TiO₂, fue de aproximadamente 30 Wim.

La pérdida de viabilidad bacteriana fue examinada por el procedimiento de recuento viable de colonias. En esta investigación, las bacterias se suspendieron con el TiO₂ amorfo previamente activado, tal como se indicó anteriormente, para determinar solamente el efecto del TiO₂ activado y no de la superposición simultánea de los dos efectos: presencia del TiO₂ y de la radiación, sobre las cepas bacterianas.

En la gran mayoría de investigaciones, la suspensión bacterias - T102 (P25, Degussa AG, Alemania) se expone continuamente a la irradiación con luz UV, dificultando la determinación del efecto, independiente, de la radiación y de la actividad fotocatalítica del TiO₂. Además, en este trabajo, se conformó una suspensión de *E. coli*, sin TiO₂, la cual se iluminó con luz UV para determinar el efecto de la radiación, y otra sin T102 para estudiar la proliferación de las bacterias en la oscuridad; esta última suspensión se tomó como referente de crecimiento de la población de células. De todas las suspensiones se tomaron muestras a los 30, 60 y 150 minutos. El conteo viable de colonias se realizó en placas Petri con agar, base sangre, después de diluciones seriadas de la muestra en caldo MH. Todas las placas se incubaron a 37⁰C durante 24 horas. La suspensión de bacterias, de partida, se conformó a una concentración de 2.7x 10⁶ UFC/ml¹⁰. En la figura 3-3 se muestran las fotografías obtenidas de los cultivos

¹⁰ Unidades Formadoras de Colonias por mililitro. Valor que indica el grado de contaminación microbiológica de un ambiente

utilizados en el método de curvas de letalidad de cepas de *Escherichia coli*. En ellas se observa el efecto de las diferentes condiciones establecidas en este ensayo, a los 30 minutos, sobre el crecimiento de las bacterias.

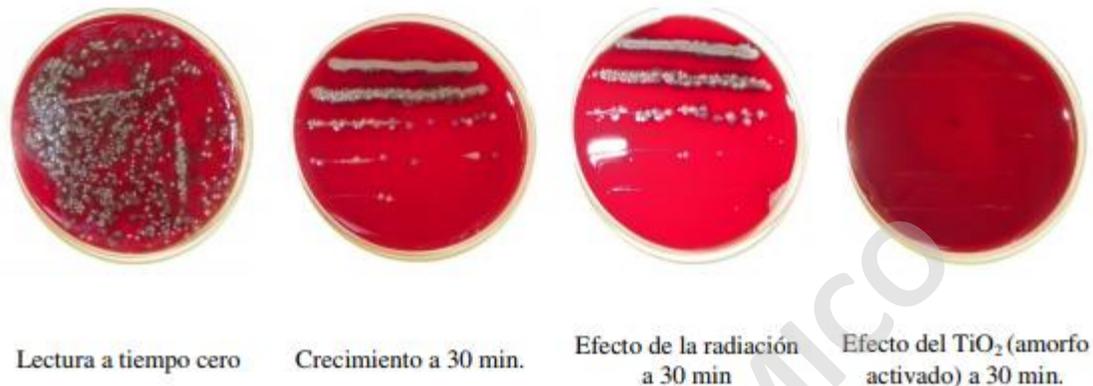


Figura 3-3 Resultados obtenidos de la evaluación del efecto de la radiación y de la presencia del TiO_2 fase amorfa, con activación previa, sobre cepas de *Escherichia coli*, después de 30 minutos de iniciados los ensayos

Fuente: Revista colombiana de materiales, publicación N°5

En estas fotografías (Figura 3-3) se puede observar la cantidad de unidades formadoras de colonias UFC/ml en el cultivo de partida, lectura a tiempo cero, y como fue el desarrollo poblacional de las mismas, a los 30 minutos, al encontrarse en un medio adecuado para su crecimiento. Además, se ilustra el desarrollo de las mismas al ser sometidas a la acción de la radiación y a la presencia del TiO_2 amorfo activado previamente. En la figura 3-3 se observa que en el cultivo inicial se presentó una gran cantidad de UFC/ml de *E. coli* y que éste fue sufriendo cambios apreciables, a simple vista, al considerar las diferentes variables de análisis.

Por otro lado, cuando el dióxido de titanio fue expuesto previamente a la acción de la radiación UV, antes de adicionado a la suspensión de bacterias, éste produjo una inactivación bacteriana total después de los 30 minutos de contacto con las bacterias. Estos resultados reiteran la gran importancia de las reacciones, superficiales, superficie del TiO_2 -membrana de la bacteria, y la gran acción bactericida que tiene el efecto fotodegradante del TiO_2 , activado previamente, sobre la proliferación del *E. coli*.

Para completar el protocolo establecido para este análisis, se observaron los sistemas a los 60 y 150 minutos de iniciados los ensayos, en ellos se observa un comportamiento similar a los cultivos tratados a 30 minutos (figura 3-3) eliminación total de las bacterias en el cultivo que contenía el TiO_2 fase amorfo activado.

La pérdida de viabilidad de las células de *E. coli* por la acción de la radiación UV y por la presencia del TiO_2 (amorfo) activado, se determinó haciendo el recuento del número de colonias presentes en los cultivos después de 24 horas de incubación. Las

curvas de UFC/ml en función del tiempo, para las diferentes condiciones de cultivo, se muestran en el gráfico 3.5. En (a) del gráfico 3.5 se muestra el crecimiento normal bacteriano, partiendo de aproximadamente de UFC/ml, así como el efecto sobre su proliferación, con el tiempo, al aplicarle un antibiótico, Trimetroprima, y someterlas a la radiación. Cuando las bacterias se sometieron a la acción del antibiótico, durante 30 minutos, se presentó una disminución en su viabilidad pero que con el paso del tiempo se volvió a incrementar levemente su proliferación.

Por otro lado, cuando las células de *E. coli* se sometieron a la acción de la radiación UV, durante 30 minutos, se disminuyó considerablemente su población y ésta siguió disminuyendo de forma lenta hasta los 150 minutos de exposición, sin alcanzar la completa eliminación de las bacterias. En el gráfico 3.5(b) se muestra que las bacterias de *E. coli* en presencia de 1 mg/ml (1000 ppm) de TiO₂ amorfo activado, todas las bacterias perdieron su viabilidad después de 30 minutos y este resultado se mantuvo todo el tiempo que duró el ensayo.

Los resultados indicados en la Figura 3-3 y Gráfico 3.5, sobre la inactivación de las bacterias, confirman que al iluminar inicialmente el TiO₂ amorfo para activarlo, éste ejerce una fuerte acción biocida sobre el *E. coli*. En el mecanismo que justifique la acción bactericida del TiO₂ amorfo activado se debe considerar el ataque de las especies de oxígeno altamente reactivas (ROS), provenientes de las partículas de TiO₂, generadas por la acción de la radiación que se hace incidir previamente sobre ellas, acción que afectaría la permeabilidad de la membrana de las bacterias, y por lo tanto de su actividad respiratoria, tal que si esta función se pierde llevaría a la muerte de las mismas; esta condición ha sido ya estudiada por diferentes investigadores; los daños en la pared celular ocurren cuando se ponen en contacto las bacterias de *E. coli* con el TiO₂ y esto puede suceder debido a que la barrera impuesta por la membrana externa de lípidos (entre 6 y 18 nm de espesor) y la capa de peptidoglicano se avería severamente por las reacciones fotocatalíticas y/o superficiales, propiciadas por la presencia del TiO₂, durante los primeros 30 minutos de los ensayos, generando, a continuación, un daño progresivo de la membrana citoplasmática, ocasionando que la bacteria se torne permeable incluso a las moléculas grandes. Al ocurrir lo anterior, la membrana citoplasmática se vería severamente afectada causando la pérdida irreversible de la viabilidad tal como se muestra en gráfico 3.5(b).

Otro proceso que no hay que descartar es la posibilidad de que las partículas de TiO₂ inicialmente se adsorban sobre la superficie de las bacterias, acción propiciada por interacciones de atracción electrostática ya que el punto de carga cero para el *E. coli* está en pH 2-3 y para el TiO₂ en pH 3.56, para luego ingresar al interior de la bacteria. Trabajos recientes sobre este tema, utilizando células eucariotas, indican que la absorción de las partículas de TiO₂ puede ser resultado de la fagocitosis. Una vez que las partículas de TiO₂ entren en las células, y la membrana citoplasmática se deteriore, los componentes intracelulares estarían más expuestos a un ataque directo. Trabajos previos indican que el TiO₂ no presenta una selectividad para atacar los componentes celulares,

por lo tanto, al ingresar, atacaría indistintamente a todos los componentes intracelulares presentes.

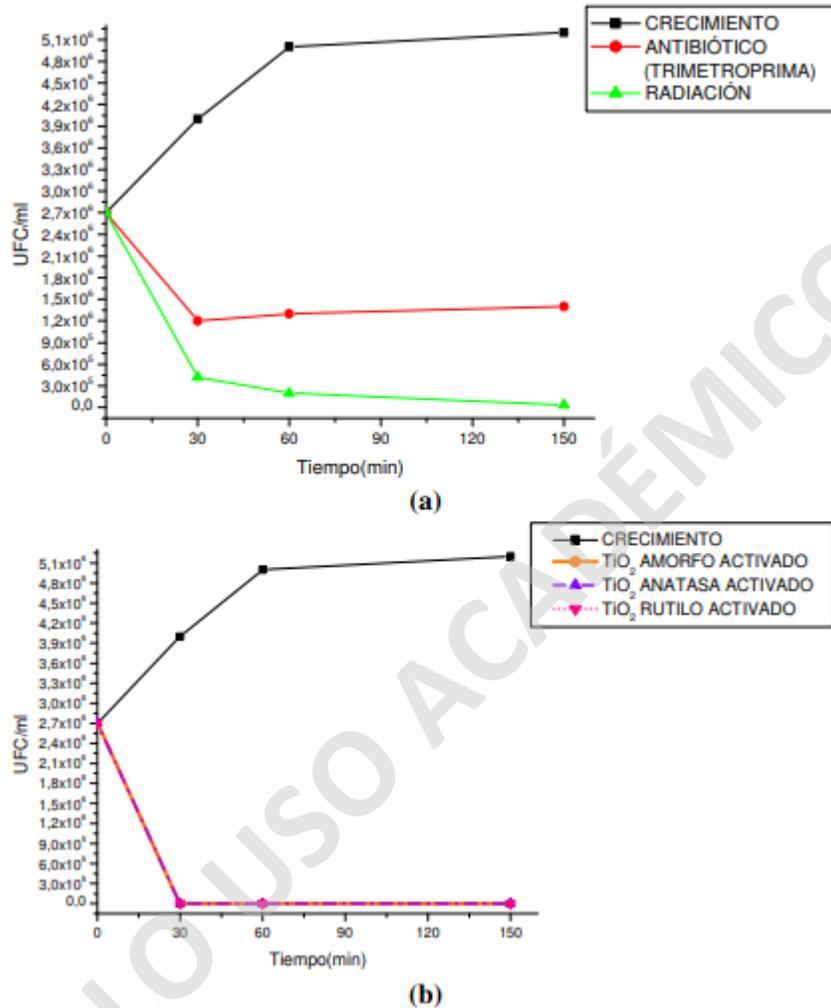


Gráfico 3.5. Curvas de número de unidades formadoras de colonias en función del tiempo que indican como varia la población del E. coli al someter los cultivos a la acción de un antibiótico (Trimetoprima) y radiación UV (a), a la exposición de TiO₂ activado previamente, utilizando radiación UV durante 1 hora (b), considerando diferentes fases presentes en el TiO₂. La concentración inicial de células en la suspensión fue de 2,7x10⁶ UFC/ml.

Fuente: Revista colombiana de materiales, publicación N05

En este estudio se sintetizó TiO₂ amorfo, con un tamaño de partícula 50 nm, usando el proceso sol-gel, a una temperatura < 350. Este dióxido activado presentó inactivación bacteriana ya que el número de unidades formadoras de colonias presentes

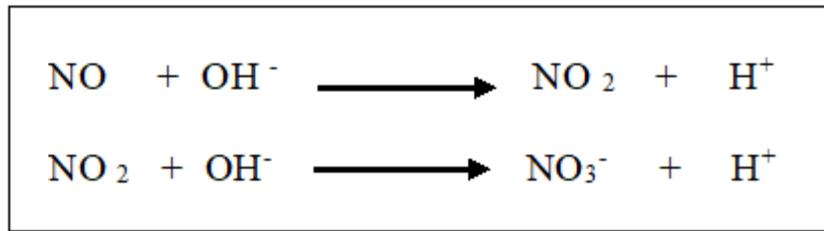
en los cultivos se redujo apreciablemente. Esto pone en evidencia el desarrollo de ciertas reacciones superficiales, propiciadas principalmente por la acción fotocatalítica del TiO₂, entre la superficie de las nanopartículas de TiO₂ y la pared de la membrana de las bacterias, reacciones que afectarían la permeabilidad de esta última y el proceso de "respiración" de los microorganismos, ocasionando su muerte. Con la metodología desarrollada en este trabajo fue posible distinguir, de manera precisa, la acción de la radiación y el de la capacidad fotocatalítica del TiO₂ amorfo, separación de acciones que permitiría actuar más sobre la última, con los conceptos de la ciencia de los materiales, para optimizarla.

3.4. Ensayo de Medición de Degradación de Compuestos Nocivos para la Atmósfera

Particularmente en este método de ensayo, los estudios y análisis se basan en la norma ISO 22197-1:2007 "Cerámicas técnicas (cerámicas avanzadas, cerámicas técnicas avanzadas). Métodos de ensayo relativos al funcionamiento de materiales fotocatalíticos semiconductores para la purificación del aire. Parte 1: Eliminación del óxido nítrico". Este ensayo consiste básicamente, en la exposición continua de una muestra a un gas contaminante bajo radiación UV, suministrada de manera artificial por una lámpara con una longitud de onda tal, que logre activar el proceso de fotocxidación del TiO₂ y la medición de las concentraciones del gas antes y después de pasar por la muestra.

AIDICO Instituto tecnológico de la Construcción de España, está dedicado a el ensayo de distintos materiales y ha realizado un método con las respectivas modificaciones contenidas en la norma UNI-11247-2010 "Determinación de la degradación de los óxidos de nitrógeno en el aire por medio de materiales inorgánicos fotocatalíticos: método de prueba en flujo continuo" para la medición de degradación de NO_x para materiales de hormigón prefabricados. Este método, basa su análisis en la medición de la actividad descontaminante de las superficies fotocatalíticas de materiales cerámicos, mediante la degradación fotocatalítica de óxido nítrico mediante una metodología analítica basada en la quimioluminiscencia, sin embargo puede resultar un método aplicable a superficies revestidas con TiO₂. Las pruebas de fotoactividad se llevan a cabo con aire que contiene NO. La cantidad de NO alimentado se fija en el valor de 1 ± 0.05 ppmv (1000 ± 50 ppbv). La degradación de NO se lleva a cabo sobre un flujo continuo del gas así obtenido, por parte de la muestra ensayada, al ser irradiada con luz ultravioleta.

La degradación de los NO_x, también conocida como proceso DeNO_x, proporciona un modelo adecuado para establecer la capacidad de una superficie fotocatalítica para la purificación del aire. El proceso DeNO_x puede ser descrito, de forma aproximada, como una reacción en dos etapas que tiene lugar en la superficie del fotocatalizador:



Donde los radicales libres hidroxilos son originados en la superficie del T102 anatasa en presencia de agua por la acción de la luz ultravioleta. Estos radicales OH^\cdot tienen un gran poder oxidante y, consecuentemente, oxidan el NO a NO_2 en una primera etapa. El NO_2 formado es posteriormente oxidado a iones nitrato (NO_3^-), los cuales son quimisorbidos por los álcalis disueltos en la matriz cementante más probablemente, pueden ser eliminados de la superficie del hormigón como ácido nítrico débil. El análisis cuantitativo de los productos de reacción, considerando la concentración inicial de contaminante, permite la evaluación de la capacidad descontaminante de la muestra a estudiar.

Preparación de la Muestra

Esta ha sido tomada a partir de las muestras proporcionadas por "Prefabricados de la Jara S.L." empresa española dedicada a la fabricación de adoquines para pavimentos que ha solicitado un ensayo de actividad fotocatalítica de su producto Eco Adoquín. La superficie expuesta de la muestra tiene unas medidas de $(10 \pm 0.5) \times (5 \pm 0.5)$ cm. de manera que quede expuesta la cara que contiene el recubrimiento a ensayar (Figura 3-4). Una vez cortadas las muestras, se han lavado con agua desionizada y secado durante 24h en estufa a 60°C .



Figura 3-4 Muestra preparada para la medición de degradación de NO_x
Fuente: <http://prefabricadosjara.com/pdf/IT120054LAJARA.pdf>

Montaje Experimental:

El utilizado y AIOICO desarrollado con la finalidad de proporcionar un caudal constante de gas contaminante y una fuente de irradiación capaz de activar el proceso de fotocatalisis. El diseño y componentes del montaje se Ilustran en la Figura 3-5.

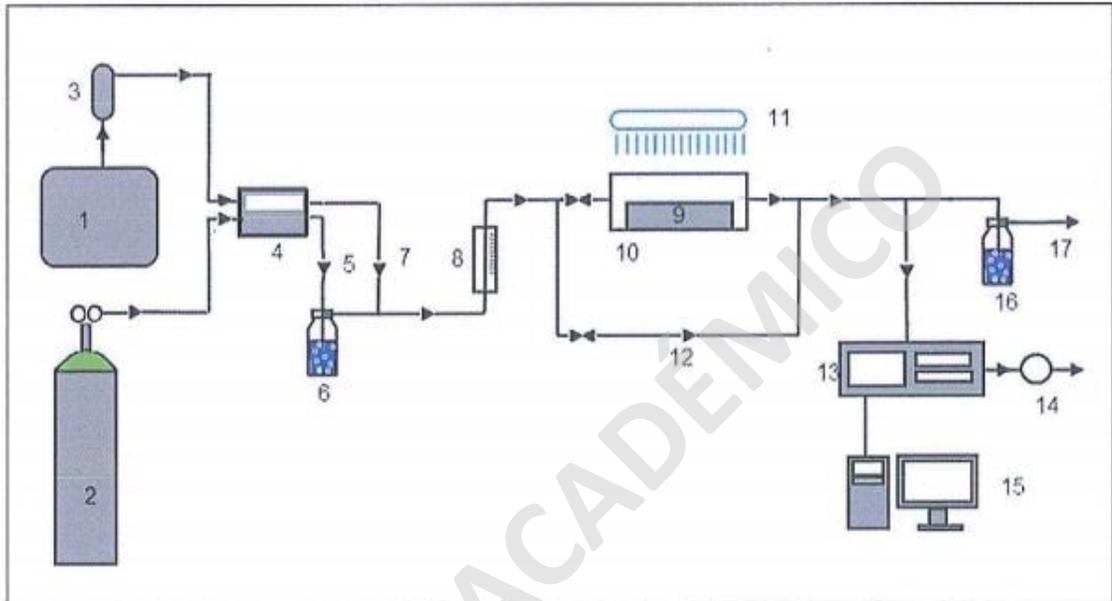


Figura 3-5. Equipo experimental para la medición de degradación de NOX

Fuente: <http://prefabricadosjara.com/>

Montaje experimental para la medición de la degradación de NOX mostrada en la Figura 3-5: 1) Compresor de aire. 2) Bala de NO en nitrógeno (100 ppmv \pm 5%). 3) Sistema de purificación y secado del aire. 4) Controladores de flujo másico. 5) Caudal de aire para el control de humedad. 6) Humidificador del caudal de aire. La humedad relativa se mantiene constante e igual a 50 ± 10 %. 7) Caudal de NO y aire. 8) Caudalímetro, verificación del caudal total. 9) Muestra. 10) Reactor. 11) Fuente de luz. 12) By-pass. 13) Sensores de temperatura y humedad relativa. 14) Analizador de quimioluminiscencia. 15) Bomba 16) PC 17) Borbotador con una disolución saturada de NaOH, para capturar los NOX antes de su salida a la atmósfera. 18) Salida de gases.

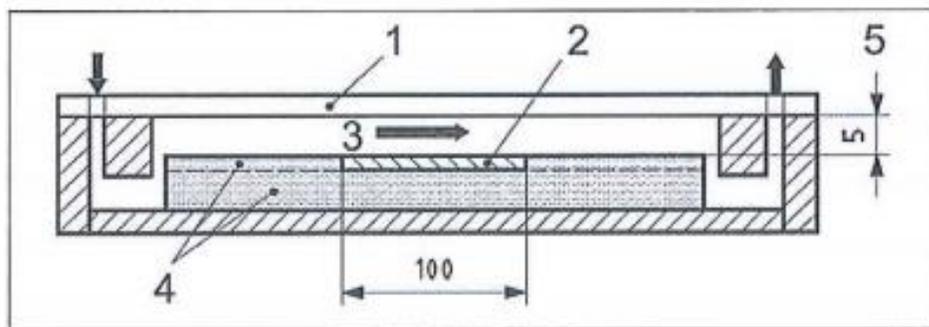


Figura 3-6. Montaje experimental para la medición de la degradación de NOX
 1) Ventana óptica 2) muestra 3) flujo de gas 4) ajuste del compartimento para la muestra 5) anchura del caudal de gas.

Fuente: <http://prefabricadosjara.com/>

El reactor (Figura 3-6 y figura 3-7), de acero inoxidable, contiene una muestra de 50 mm de ancho, con la superficie paralela a la ventana óptica de irradiación, de cuarzo borosilicatado. La muestra se encuentra separada de la ventana por una distancia de 5 mm, de manera que el gas pasa rápidamente a través del espacio comprendido por la superficie de la muestra y la ventana.



Figura 3-7. Izquierda, lámpara OSRAM Vitalux y fotoreactor. Derecha, detalle del fotoreactor.

Fuente <http://prefabricadospra.com/>

Procedimiento para la Medición de Degradación Fotocatalítica del NO

1. Pretratamiento de la muestra: La muestra, ya cortada en las dimensiones adecuadas para el reactor, es irradiada con la lámpara UV durante al menos 5h para descomponer materia orgánica residual. La irradiancia UV en la superficie de la muestra debe ser elevada para asegurar la completa descomposición de la materia orgánica (10 W/m^2 o mayor).
2. Lavado con agua Se introduce la muestra en agua desionizada durante al menos 2h. Transcurrido ese tiempo, se saca y se deja secar a temperatura ambiente. Posteriormente, se seca durante 24h en una estufa a 600C
3. Ensayo de eliminación de gases contaminantes: El ensayo emplea el siguiente procedimiento para obtener la cantidad de gas contaminante adsorbido por la muestra en la oscuridad, la eliminada por fotoirradiación y la desorbida después de la fotoirradiación.

En primer lugar, se ajusta la alimentación de gas a una concentración estable de NO de $1.0 \text{ ppm} \pm 0.05 \text{ ppm}$ ($1000 \text{ ppb} \pm 50 \text{ ppb}$) y una humedad relativa del 50% a 250C , para un caudal total de 3 L/min . Durante este período de tiempo, se enciende la lámpara y se registra la irradiancia una vez ésta es estable.

Se coloca la muestra en el fotoreactor y se coloca la ventana de vidrio, ajustando la distancia entre la muestra y la ventana a $5.0 \pm 0.5 \text{ mm}$. Se comprueba la ausencia de fugas de la junta del reactor.

Se procede a pasar el flujo de gas por el fotoreactor, sin fotoirradiación (t_0). El caudal total del gas debe ser de $3.0 \text{ L/min} \pm 0.15 \text{ L/min}$, que equivale a una velocidad lineal de aproximadamente 0.2 m/s por el reactor. Se continúa el flujo durante 30 minutos y se registra el cambio en la concentración de NO y NO_2 bajo condiciones de oscuridad. Si la concentración de NO_x es inferior al 90% de la concentración alimentada tras 30 minutos, se continúa hasta superar este valor.

Se mantiene el flujo de gas y se comienza la irradiación de la muestra (t_1). Se registra la concentración de NO y NO_2 bajo irradiación durante 5h.

Transcurrido ese tiempo, se cierra la alimentación de NO (t_2) y se registra la concentración de NO_x , en oscuridad, durante otros 30 minutos.

Finalmente, se detiene la circulación de gas por el reactor (t_3) y se saca la muestra del mismo.

Resultados

La Tabla 3.2 presenta los resultados obtenidos. En la columna de la izquierda se han presentado los resultados para los cálculos indicados en la norma ISO 22197-1. En la columna de la derecha se han presentado los resultados corregidos, teniendo en cuenta la superficie de la muestra y la irradiación teóricas ($S \text{ cm}^2$ e 10 W/m^2 , respectivamente) y las reales.

Tabla 3-2. Cantidades (micromoles) de NO y NO_x, eliminados y de NO₂ formado.

$n_{\text{ads}} (\mu\text{mol})$	0.02	$n_{\text{ads, corr}} (\mu\text{mol})$	0.02
$n_{\text{NO}} (\mu\text{mol})$	4.49	$n_{\text{NO, corr}} (\mu\text{mol})$	4.62
$n_{\text{NO}_2} (\mu\text{mol})$	1.29	$n_{\text{NO}_2, corr} (\mu\text{mol})$	1.33
$n_{\text{des}} (\mu\text{mol})$	0.02	$n_{\text{des, corr}} (\mu\text{mol})$	0.02
$n_{\text{NO}_x} (\mu\text{mol})$	3.21	$n_{\text{NO}_x, corr} (\mu\text{mol})$	3.30

Fuente: <http://prefabricadosjara.com/>

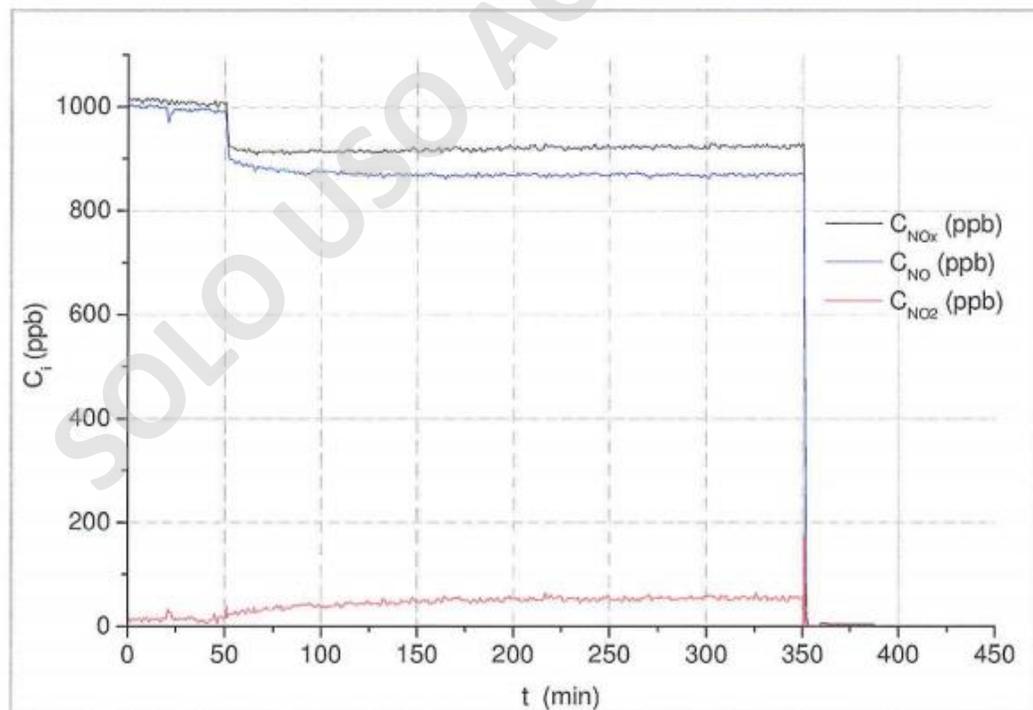


Gráfico 3.6. Curva típica de degradación de NO_x

Fuente: <http://prefabricadosjara.com/>

La actividad fotocatalítica de la muestra obtenida mediante la medición de degradación de NO_x según norma ISO 22197-1 : 2007, se resume en la Tabla 3-3:

Tabla 3-3. Resumen de los resultados obtenidos, según ISO 22197-1 (izquierda) y normalizados para una probeta de superficie 50 cm² y una irradiancia de 1 mW/cm² (derecha)

Parámetro	Valor obtenido según ISO 22197-1 (μmol)	Valor corregido (μmol)
Cantidad de NO _x eliminada, η_{NO_x}	3.21	3.30
Cantidad de NO ₂ generado, η_{NO_2}	1.29	1.33
Cantidad de NO _x adsorbido, η_{ads}	0.02	0.02
Cantidad de NO _x desorbido, η_{des}	0.02	0.02
Fracción de recuperación de N en agua, η_w	0.6	-

Fuente: <http://prefabricadosjara.com/>

CAPÍTULO 4

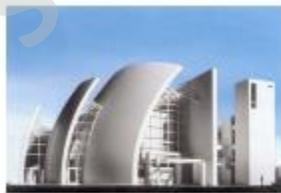
APLICACIONES Y USOS GENERALES DE LA FOTOCATÁLISIS EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Los denominados "materiales fotocatalíticos" que en el último tiempo se han transformado en una forma eficaz e inocua de descontaminar el aire, también han logrado excelentes propiedades autolimpiantes y bactericidas, otorgándoles, de esta forma, un importante valor agregado en sus usos y aplicaciones. En general estos materiales fotocatalíticos son sometidos a un proceso especial en su fabricación adicionando dióxido de titanio en su contenido de tal forma de obtener las propiedades mencionadas.

4.1. Cemento Fotocatalítico

El principio activo que le otorga propiedades fotocatalíticas al cemento lo es un producto muy versátil, ya que es posible utilizarlo en distintas aplicaciones tales como: mortero, placas de revestimiento de hormigón prefabricado, adoquines, mobiliario urbano de hormigón microvibrado, etc., todos con propiedades descontaminante y autolimpiante otorgándoles un valor agregado a todos estos subproductos que se fabrican con este tipo de cemento. En general estos cementos son adicionados con dióxido de titanio el cual posee proporciones de anatasa y rutilo que están ya calculadas y diseñadas, aunque una forma de realizar a modo experimental un cemento fotocatalítico es con el uso de un producto conocido con el nombre de Degussa P25 que es dióxido de titanio en proporciones de 80:20.

Algunos ejemplos de infraestructuras construidas con fachadas de hormigón que posee cemento son (Figura 4-1), en cuya construcción se implementó un nuevo cemento blanco desarrollado por la empresa Italcementi conocido como TX Millennium con la finalidad de mantener la pureza del blanco de la fachada debidos a la propiedad de autolimpieza que se logra mediante la adición de nanopartículas de dióxido de titanio al cemento.



Misericordia Church, Roma (2003)



Musique et des Beaux Arts à Chambéry (2000)



Private buildings close to Bergamo (1997-1998)

Figura 4-1. Ejemplos de infraestructuras construidas con fachadas de hormigón

Fuente:http://www.aparejadoresmadrid.es/archivos/jornadaes/15/descontaminaci%C3%B3n_del_aire_en_ciudades.pdf

Gracias a la descomposición de los principales agentes nocivos y contaminantes que se acumulan en la superficie, tales como óxidos de azufre óxidos de nitrógeno (NOX), amoníaco (NH₃), monóxidos de carbono (CO) (Figura 4-2), se logra que las fachadas y demás elementos arquitectónicos, en los que se emplea cemento fotocatalítico, mantengan su aspecto estético durante periodos de tiempo mucho más prolongados que con cementos tradicionales.

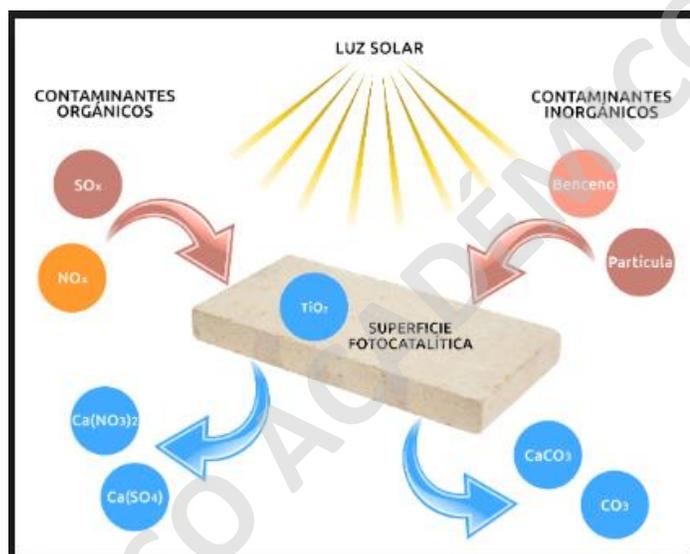


Figura 4-2. Efecto de la Fotocatálisis sobre una superficie de cemento adicionado con TiO₂

Fuente: <http://econanosolutions.com/nanonews/blog/tag/fotocatalisis/>

4.2. Cerámica Fotocatalítica

Disminución de costos de mantenimiento y aseo, considerable ahorro de tiempo en limpieza, además de superficies más higiénicas son algunas de las ventajas que se obtienen de una cerámica con propiedades fotocatalíticas.

Principalmente la superficie fotocatalítica de una cerámica se logra añadiendo dióxido de titanio al esmalte en su proceso de fabricación, teniéndose especial cuidado en generar una superficie uniforme ya que cualquier micro-hueco afecta la capacidad de la capa.

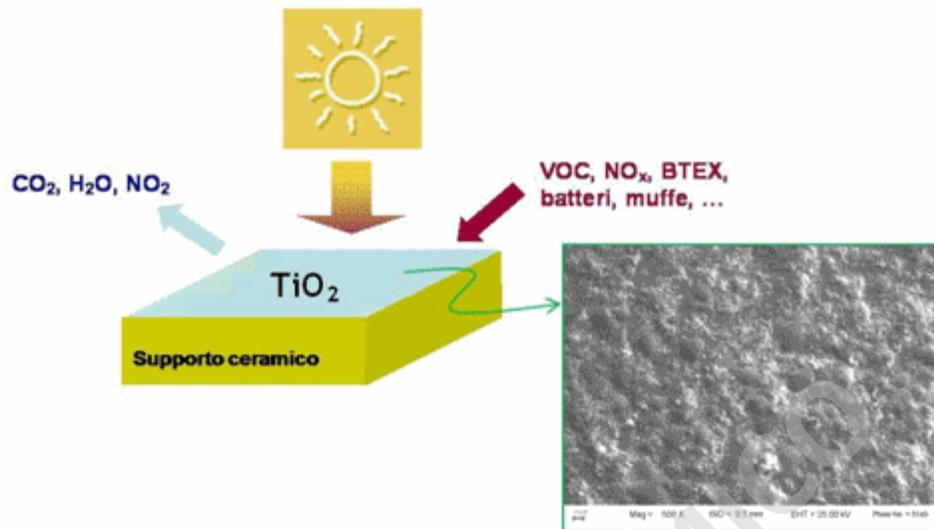


Figura 4-3. Cerámica exterior Fotocatalítica

Fuente: <http://www.centroceramico.it/en/photocatalysis-antibacterial/>

Principales propiedades de una cerámica fotocatalítica

- **Acción Bactericida:** La superficie fotocatalítica de estas cerámicas eliminan eficazmente una diversidad de microorganismos, tales como bacterias, virus, hongos, moho y algas. Esto se debe a que los radicales libres generados por efecto de la fotocatalisis son capaces de destruir la membrana celular de estos microorganismos.
- **Acción Desodorizante:** La acción fotocatalizadora de las superficies cerámicas inducen a la descomposición de los Compuestos Orgánicos Volátiles (VOCs) al destruir sus uniones moleculares internas.
- **Acción Purificadora del Aire:** Esta propiedad se origina gracias a la capacidad de esta superficie fotocatalizadora de descomponer contaminantes nocivos presentes en el aire como son los NO_x los SO_x

4.3. Pintura Fotocatalítica

Desde hace tiempo, el aprovechamiento del efecto fotocatalítico en pinturas constituye un auténtico reto para los departamentos I + D de los más renombrados fabricantes de pinturas, ya que la incorporación de estos pigmentos especiales a una pintura convencional conlleva problemas importantes: La característica peculiar del fotocatalizador de poder descomponer sustancias orgánicas, también afecta a los ligantes de una pintura basada en resinas orgánicas. Por tanto, los ligantes más habituales de las pinturas plásticas acrílicas, pinturas siloxánicas o siliconadas no acaban de ser adecuados

para productos fotocatalíticos. El proceso de fotocatalisis provoca la "autodestrucción" superficial del ligante orgánico, con lo que la pintura envejece y se degrada prematuramente. Por tanto, la disyuntiva a la hora de formular una pintura orgánica con componentes fotocatalíticos se resume en la Figura 4-3.

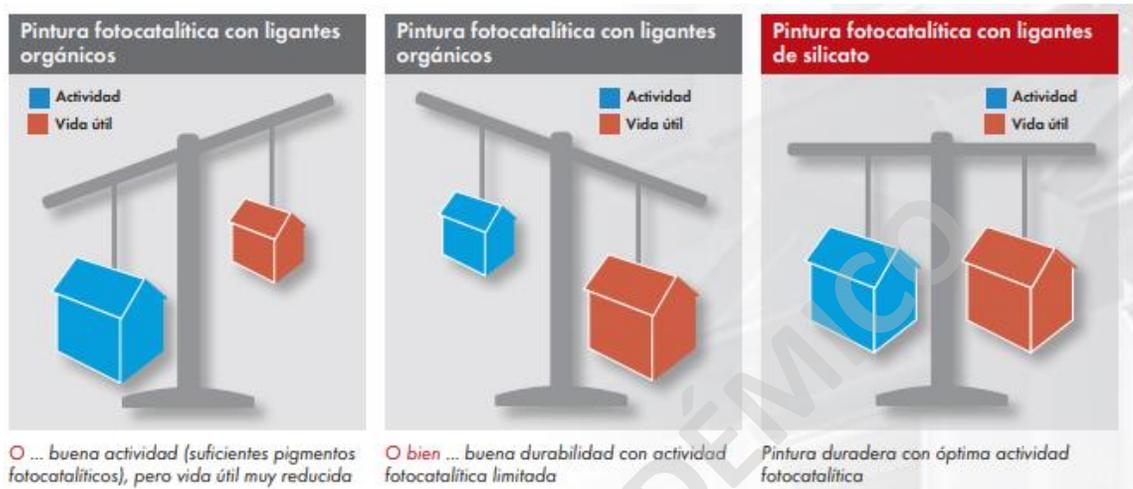


Figura 4-4. a) Buena actividad (suficientes pigmentos fotocatalíticos), pero vida útil muy reducida. b) Buena durabilidad con actividad fotocatalítica limitada. c) Pintura duradera con óptima actividad fotocatalítica

Fuente: Pintura fotocatalítica de sol-silicato —Protege la fachada y limpia el ambiente, Pinturas KEIM

- Buena actividad fotocatalítica (suficiente cantidad de pigmento), pero con una vida útil notablemente reducida del producto. o bien
- Pintura con buena durabilidad, pero con un efecto fotocatalítico reducido.

Tan solo el empleo de ligantes inorgánicos (silicato potásico, sol de sílice, sol de silicato) permite el uso de cantidades significativas de dióxido de titanio fotocatalítico, ya que los ligantes minerales no son atacados por el fotocatalizador. Además, la estructura microporosa de las pinturas de silicato aumenta la disponibilidad del fotocatalizador ante la presencia de gases contaminantes, al disponer de una superficie de contacto específica mayor a la que ofrece una pintura filmógena.

- Estas pinturas actúan usando la luz, cuando la pintura recibe algún tipo de luz natural o artificial se pone en marcha el proceso de 'fotocatálisis'. Las pinturas están fabricadas con una tecnología novedosa. Llevan dióxido de titanio ultra fino (TiO₂), que absorbe la energía de la luz y la transforma en vapor de agua ordinario.

- La fotocatalisis es un proceso natural, una reacción ante la luz, que convierte esta energía en química en la superficie de un catalizador. En este caso la pintura, mediante este proceso se descomponen las partículas que hay suspendidas en el aire. Durante el proceso se dan reacciones de oxidación y reducción, y gracias a estos procesos se promueven que estas sustancias contaminantes se conviertan en inocuas. Por ejemplo el NOX u óxido de Nitrógeno que se puede convertir en ácido nítrico, se neutraliza por las partículas de carbonato de calcio alcalino en la pintura.

1. El contaminante se absorbe en la superficie del material.
2. El contaminante se oxida produciendo un compuesto inerte. los nitratos (NO₃).
3. El compuesto inerte es eliminado de la superficie del material por efecto de la lluvia.

Ventajas:

Los recubrimientos fotocatalíticos representan un paso adelante en las tecnologías medioambientales y de la salud:

- No solo son productos limpios sino que además limpian los ambientes contaminados.
- Destruyen la suciedad y evitan el crecimiento de microorganismos
- Además de favorecer al Medio Ambiente, presenta enormes beneficios para la salud de los usuarios
- Una vez aplicado, su efecto es permanente
- Ahorra costes de mantenimiento ya que las superficies fotocatalíticas se mantienen limpias muchos años

Propiedades:

Las pinturas fotocatalíticas son productos diseñados y desarrollados utilizando los últimos avances en nanotecnología.

Se trata de revestimientos completamente atóxicos que, comparados con los revestimientos tradicionales, tienen unas excelentes propiedades a la hora de.

- Eliminar la contaminación en el exterior e interior de los edificios

- Eliminar los COVs procedentes de productos para el hogar, disolventes, fungicidas y combustión
- Prevenir la aparición de moho o musgo
- Evitar la suciedad en las paredes
- Actuar como desinfectante y desodorante de las habitaciones y locales
- Esterilizar destruyendo las bacterias presentes en el aire
- Evitar la propagación de infecciones respiratorias

Aplicaciones:

El campo de aplicación de los recubrimientos fotocatalíticos es muy amplio y podemos aplicarlos en nuestra propia casa:

- Revestimientos arquitectónicos ● Puertas y pomos
- Componentes electrónicos y aislantes eléctricos
- Perfilería de aluminio
- Mobiliario y recubrimientos deslizantes
- Mobiliario urbano y de colectividades

Estamos hablando, en definitiva, de pinturas autolimpiantes que absorben los NOX del ambiente, transformándolos en nitratos inoocuos que son arrastrados por la lluvia.

Datos a tener en cuenta sobre las pinturas fotocatalíticas

- Este tipo de pinturas funcionan, están usándose ya en ciudades como París, Londres o Manila donde los niveles de contaminación son altos. Por ejemplo en un estudio para ensayar la eficacia de las pinturas fotocatalíticas se pintó un muro de 300 metros en Sir John Cass School en Londres. Esta superficie de 300 metros pintados limpió aproximadamente 10.000 cúbicos de aire al día. Esto es lo equivalente a la contaminación producida por el tubo de escape de 2.000 coches.
- También se han llevado a cabo pruebas en la estación de Metrorail en la vía más transitada del metro de Manila. El ensayo consiste en pintar más de 5.200 metros cuadrados, que dado que reciben mucha luz son ideales para el proceso de la fotocatalisis. Los primeros resultados es que logra purificar 1,3 toneladas de NOX al año. Esto sería la estación de depuración de aire de más importante del mundo.

- Se están realizando ensayos con este tipo de pinturas en la avenida metropolitana de Manila una zona con alta contaminación. El ensayo consiste en pintar más de 5.200 metros cuadrados, que dado que reciben mucha luz son ideales para el proceso de la fotocatalísis.

4.4. Vidrios Fotocatalíticos



Figura 4-5. Vidrio incoloro sobre el que se ha depositado una capa transparente de un mineral fotocatalítico e hidrófilo.

Fuente: <http://www.fenster.es/noticias/SGG-Bioclean-vidrio-autolimpiable/>

Las propiedades del vidrio autolimpiable (Figura 4—4) dependen de un tratamiento, mediante el cual se deposita una capa transparente de un material mineral fotocatalítico e hidrófilo. El vidrio autolimpiable supone toda una revolución en lo que a limpieza de cristales y mantenimiento de edificios se refiere, al minimizar ambas tareas.

Estos vidrios funcionan de la siguiente manera: la luz del día descompone la suciedad acumulada en la superficie de los acristalamientos, que posteriormente será arrastrada por el agua de lluvia. Así pues, el vidrio entra en funcionamiento mediante la acción conjunta de los rayos UV y del agua de lluvia, luchando eficazmente contra la suciedad acumulada sobre la cara exterior del vidrio, como las marcas de lluvia, de polvo, de niebla y restos orgánicos de contaminación atmosférica. Incluso cuando no llueve, la instalación de este vidrio resulta interesante, puesto que la fotocatalísis descompone la suciedad orgánica y la limpieza resulta mucho más sencilla.

El resultado de la acción autolimpiante, depende de varios factores: cantidad y naturaleza de la suciedad, exposición al sol y al agua de lluvia y por último, el grado de inclinación de los cristales.

Se pueden incorporar, como una prestación, a cualquier vidrio. Por lo que, se usa también como un aislamiento acústico, control solar, y como seguridad; así aunar en un sólo producto, todas las prestaciones necesarias, para convertir el vidrio en su aliado.

BENEFICIOS:

- Repelencia Agua y Matrices Liquidas.
- Reduce frecuencia de limpieza en un 80%.
- Mayor resistencia a las rayas.
- Intensifica el Brillo del Vidrio en un 20%.
- Control pasivo de microorganismos.
- Resistencia a la corrosión Salina (Manchas de agua en los vidrios, marcas de cemento, pintura, propiedades anti grafiti).

SUPERFICIES:

Cabinas de baño, fachadas, ventanas, vitrinas de tiendas, techos de vidrio, vidrios de vehículos, yates, barcos, transporte público, tractores, industria minera aeronaves, paneles solares, fábricas de vidrio templado y laminado, cerámica sanitaria.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS

Sea efectuado un análisis económico para la evaluación de costos, específicos, y un cuadro comparativo entre un mismo material, cerámica, diferenciando uno del otro por su propiedad fotocatalítica y no fotocatalítica, este análisis tiene como finalidad demostrar los retornos a través de una línea de tiempo, utilizado como referencia la cerámica para hospitales.

Desde el punto de vista de la atención hospitalaria la principal problemática son las enfermedades intrahospitalarias, ya que un paciente puede estar expuesto a una gran variedad de microorganismos presentes en el ambiente hospitalario durante la espera y su atención, lo que implica muchas veces que esta persona adquiera otras enfermedades. Una solución a este problema serían las cerámicas fotocatalíticas, ya que poseen la propiedad bactericida. Otra gran diferencia y ventaja con respecto a la desinfección mediante productos químicos de las superficies cerámicas, es que esta propiedad bactericida es continua no así los productos químicos que actúan en un lapso de tiempo muy determinado debido a que estos se degradan.

5.1. Descripción del Lugar a Evaluar

Se simulará la instalación en un centro hospitalario, específicamente en salas de entrega de información y en salas de espera ya que en estos lugares se utilizan cerámicos en revestimientos de piso y muro, por lo tanto estos lugares requieren una mayor frecuencia de aseo, la superficie estimada a evaluar será de 3000 m²

5.2. Análisis de Precio Unitario

Para el análisis de precio unitario se separó en cuadros comparativos que hicieran posible analizar el costo anual (véase Tablas 5-1, 5-2, 5-3, 5-4, y 5-5), a fin de evaluar una recuperación en la inversión extra que implica cambiar de cerámica estándar a cerámica fotocatalítica. Para efectos de costos se evaluó el precio unitario en UF (unidad de fomento) con valor al 30 de julio de 2018 de \$ 27.201,60. Desde ese punto de vista se pretende analizar la factibilidad de instalar cerámicas fotocatalíticas considerando los ahorros de costos.

Cerámica Estándar.

Tabla 5-1. Análisis de precio unitario cerámica estándar

Ítem	Descripción	Uni	Cantidad	Precio unit (\$)	Precio UF	Total (UF)
1	Active Clean Air & Antibacterial Ceramic 30x60 blanco rectificado	m ²	1.08	9900	0.364	0.393
2	Beckron DA/saco 25 kg	Saco	0.25	11190	0.411	0.103
3	Fragüe color blanco/bolsa 1 kg	Bolsa	0.45	1290	0.047	0.021
4	Separadores cerámica 2mm	Bolsa	0.085	1190	0.044	0.004
5	Subcontrato instalación	m ²	1	5000	0.184	0.184
Subtotal						0.705

Fuente: Elaboración Propia

Cerámica con Propiedades Fotocatalíticas

Tabla 5-2. Análisis de precio unitario cerámica fotocatalítica

Ítem	Descripción	Uni	Cantidad	Precio unit (\$)	Precio UF	Total (UF)
1	Active Clean Air & Antibacterial Ceramic 30x60 blanco rectificado	m ²	1.08	17000	0.625	0.675
2	Beckron DA/saco 25 kg	Saco	0.25	11190	0.411	0.103
3	Fragüe color blanco/bolsa 1 kg	Bolsa	0.45	1290	0.047	0.021
4	Separadores cerámica 2mm	Bolsa	0.085	1190	0.044	0.004
5	Subcontrato instalación	m ²	1	5000	0.184	0.184
Subtotal						0.987

Fuente. Elaboración Propia

Análisis de Costo para Insumos y Personal para Aseo

Superficie a evaluar. 3.000 m² de cerámica

Tabla 5-3. Análisis de costos en artículos de aseo para cerámica estándar

Materiales	Precio unit (\$)	Precio unit (UF)	Vida útil (meses)	Costo mensual UF	Hospital M ²	Aseo m ² /mes	Costo mensual /M2 (UF)	Costo anual (UF)
carro	39990	1.470	12	0.122511176	3000	90000	0.0000014	1.47013411
Mopa	4990	0.183	1	0.183445091	3000	90000	0.0000020	0.183445091
guantes	1990	0.073	0.25	0.292629845	3000	90000	0.0000033	0.073157461
señales	4990	0.183	12	0.015287091	3000	90000	0.0000002	0.183445091
sub total								1.910181754

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5-4. Análisis de costos en artículos de aseo para cerámica fotocatalítica

Materiales	Precio unit (\$)	Precio unit (UF)	rendimiento m2	Costo UF/ m2 por día	Hospital M ²	Aseo m ² /mes	Costo mensual /M ²	Costo anual (UF) en 3000m2
Cloro	2690	0.099	2000	0.0000494	3000	30	0.001483369	53.401271
Amonio	4100	0.151	2000	0.0000754	3000	30	0.002260896	81.392271
Agua	1	0.000037	100	0.0000004	3000	30	0.00001103	0.397035
sub total								135.19

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5-5. Costos de personal de aseo. Considerando 2 personas con un sueldo de \$490.000 imposables

	Costo mensual (\$)	Costo mensual (UF)	Costo anual (UF)
Personal de aseo	980000	36.027	432.3275101

Fuente, Elaboración Propia

5.3. Análisis de retorno de la inversión

Considerando que el costo de la cerámica fotocatalítica es un 50% mayor en comparación a la Estándar se desea conocer cuál es periodo en que se recupera este mayor costo considerando que ganamos en el ahorro de cloro y amonio cuaternario por concepto de aseo y desinfección de ésta, el análisis del estudio económico se muestran en las tablas 5-6 y 5-7.

Tabla 5-6. Estudio económico para cerámica estándar

ESCENARIO "A" EN UN PERIODO DE 8 AÑOS									
Descripción	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Instalación	2115								
Aseo		569,41	569,41	569,41	569,41	569,41	569,41	569,41	569,41
Total anual	2115	569,41	569,41	569,41	569,41	569,41	569,41	569,41	569,41
Total acumulado	2115	2684,41	3253,82	3823,23	4392,64	4962,05	5531,46	6100,87	6670,28

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5-7. Estudio económico para cerámica fotocatalítica

ESCENARIO "B" EN UN PERIODO DE 8 AÑOS									
Descripción	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Instalación	2961								
Aseo		434,2376919	434,2376919	434,2376919	434,2376919	434,2376919	434,2376919	434,2376919	434,2376919
Total anual	2961	434,2376919	434,2376919	434,2376919	434,2376919	434,2376919	434,2376919	434,2376919	434,2376919
Total acumulado	2961	3395,237692	3829,475384	4263,713076	4697,950768	5132,18846	5566,426151	6000,663843	6434,901535

Fuente: Elaboración Propia

Resultados

Con los valores obtenidos se determina que el periodo de retorno para el incremento en el costo de instalación para el escenario B (cerámica fotocatalítica) se logra a los 7 años y 6 meses como se muestra en el Gráfico 5.1. Se desprende entonces, que a mediano plazo es posible obtener un retorno considerando como ganancia el ahorro

en materiales para el aseo especializado en desinfección lo que repercute de forma positiva en el costo extra de inversión.

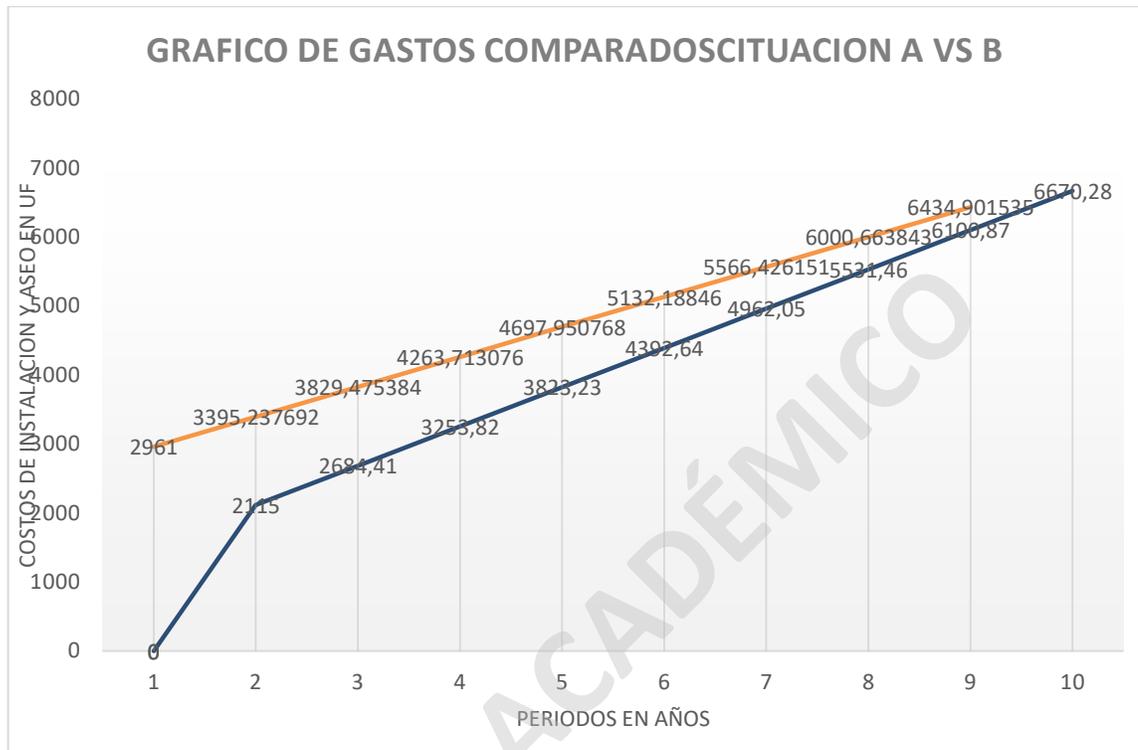


Gráfico 5.1. Comparativo de costos entre cerámica estándar y otra fotocatalítica. El punto de intersección entre ambas curvas indica el periodo en que se igualan los gastos de mantenimiento entre ambas cerámicas

Fuente, Elaboración Propia

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al utilizar el dióxido de titanio como semiconductor se logra una mejor eficacia en la fotocatalisis para materiales utilizados en la construcción, debido a que su uso es inocuo y relativamente de bajo costo, en su aplicación. Se establece que para realizar una reacción fotocatalítica es requerida una fuente de energía natural, como la luz UV (longitud de onda de 385 nm), el oxígeno del aire y agua presentes en la humedad ambiente. De esta forma se activa un proceso de óxido-reducción capaz de degradar y descomponer agentes orgánicos y contaminantes, presentes en los materiales, en este caso de construcción.

El proceso fotocatalítico en materiales de construcción es utilizado según su requerimiento, estos pueden ser de autolimpieza, bactericida y descontaminación del aire. A grandes rasgos se puede decir que, la fotocatalisis crea una superficie súper hidrofílica que impide la adherencia de materia orgánica y el proceso de óxido-reducción degrada la suciedad de las superficies además de degradar contaminantes del aire como los NOx, y COV's (propiedades de autolimpieza y descontaminante del aire), con este proceso oxidativo es capaz de destruir la membrana celular de las bacterias y hongos deteniendo su multiplicación, dándose a entender con esto una propiedad bactericida.

Los ensayos que se han estudiado demuestran que, de la fotocatalisis con dióxido de titanio se obtienen resultados positivos para cada una de las propiedades, sin embargo es necesario ahondar más en las investigaciones ya que como aditivo extra, el TiO₂, puede afectar las propiedades de un material específico, como ejemplo, el cemento puede ser afectado en sus propiedades mecánicas si las proporciones de TiO₂ son muy elevadas, otro ejemplo, es la pintura, en la cual el TiO₂ no se puede incorporar a pinturas que contengan ligantes orgánicos, ya que estas se degradan prematuramente y envejecen pronto. Lo que provoca una vida útil corta, esto se debe a que el proceso de fotocatalisis se encarga de descomponer los agentes orgánicos, por otro lado las pinturas con ligantes inorgánicos como (silicato potásico, sol de sílice, sol de silicato) permiten el uso de TiO₂ como semiconductor, sin provocar una degradación de la pintura obteniéndose excelentes propiedades fotocatalíticas.

Desde el punto de vista del análisis económico se establece que el costo extra por el aumento en el precio de una cerámica fotocatalítica al ser evaluada como un reemplazo para una cerámica estándar en salas de espera y de informaciones de un recinto hospitalario (estimación de acuerdo al mercado) es posible recuperarlo en el mediano plazo gracias al ahorro en materiales para el aseo, particularmente **3 años y 5 meses** es el periodo de recuperación de la inversión para este estudio, debido a la propiedad bactericida de estas cerámicas fotocatalizadas.

La aplicación de la fotocatalisis en los materiales de la construcción tiene un gran espectro, entre los cuales se pueden enumerar las fachadas, los pavimentos, las

cubiertas, los revestimientos y otros. Una aplicación ambiciosa en España por ejemplo son las llamadas ‘Islas fotocatalíticas’ que consisten en una zona urbana donde todas las superficies, que han sido tratadas con esta tecnología: pavimentos, techos y fachadas, contribuyen a limpiar el aire.

Concretamente, el proceso fotocatalítico se puede aplicar sobre una amplia gama de materiales de la construcción y en elementos urbanos que una vez tratados con TiO_2 (el cual es el catalizador), adquieren propiedades descontaminantes de la superficie y el aire. La mayor eficiencia se logra cuando son expuestos a una fuente de luz ultravioleta, de esta manera las fachadas exteriores logran mejores resultados al ser irradiados por los rayos solares.

Por otro lado el cemento fotocatalítico en base a dióxido de titanio disminuye sus propiedades mecánicas y reduciendo su resistencia, por lo que se recomienda su uso en revestimientos como morteros y prefabricados de hormigón microvibrado.

Fomentar el uso de la fotocatalisis en los materiales de la construcción es una gran alternativa para reducir las concentraciones de contaminación del aire, lo que conlleva a mejorar sustancialmente la salud de las personas.

Nuestro país debe plantear políticas públicas para incentivar los estudios y el uso de esta nueva tecnología fotocatalítica y poder reducir los niveles contaminantes, de ciudades grandes tales como Santiago, Concepción, entre otras.

BIBLIOGRAFIA

Asociación Ibérica de la fotocatalisis <http://www.fotocatalisis.org> (22 de mayo 2018)

La Fotocatálisis: Aspectos Fundamentales para una buena remoción de contaminantes. César Augusto Jaramillo Páez, Gonzalo Taborda Ocampo

Semiconductores con actividad Fotocatalítica. Roberto J. Candal, Sara A. Bilmes y Miguel A Blesa <https://www.psa.es/en/projects/solwater/files/CYTED01/10cap04.pdf> (30 de mayo 2018)

Nanotecnología de semiconductores, Materiales de Construcción Autolimpiantes y Antibactericidas para usos en interiores y al aire libre. Fabián Orellana Araya, Dr. En Ciencias mención Química PUCV.

Evaluación de las Propiedades Físicas y Fotocatalíticas de Cemento adicionado con nanopartículas de Dióxido de Titanio. Carolina Cárdenas Ramírez, Universidad Nacional de Colombia <http://prefabricadosdelajara.es> (02 de julio 2018)

Guía práctica de la Fotocatálisis Aplicada a Infraestructuras Urbanas. CONAMA 2012; Congreso Nacional del Medio Ambiente. España

Nanomateriales Activos para la reducción de Gases de Combustión (Proyecto Fénix). ASEFMA Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas

Estado del arte de los materiales a base de cemento que contienen TiO₂: propiedades auto-limpiantes. A Maury, N. De Belie.

Fotosíntesis Artificial. <http://www.elorigendelhombre.com/fotosintesis%20artificial.html> (16 de junio 2018)

<http://www.mimbrea.com/pinturas-fotocataliticas-para-purificar-el-aire/> (13 de julio 2018)

https://www.socoter.cl/corporativo/index.php?searchword=fotocatalisis&ordering=&searchphrase=all&Itemid=61&option=com_search (15 de julio 2018)

http://www.iso.org/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=40761 (18 julio 2018)

<http://Intelligentwalls.blogspot.com/2013/06/vidrios-que-se-limpian-soloslike-boss.html> (18 de julio 2018)

www.italcementigroup.com (18 julio 2018)

<http://www.bdigital.unal.edu.co/7354/> (22 julio 2018)

<http://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/25998-El-dioxido-de-titanio-disminuyela-contaminacion4el-aire.html> (20 de julio 2018)

<http://www.alfredofenollar.com/bio-innova.html> (12 de junio 2018)

<http://www.protekthor.com/vidrios.html> (19 de julio 2018)

<http://www.cancer.ucla.edu/index.aspx?recordid=298&page=644> (10 de julio 2018)

<https://www.medicina21.com/Articulos/V3827/Investigan-las-propiedades-cancerigenas-del-dioxido-de-titanio-un-componente-habitual-de-ciertos-productos-de-uso-diario.html> (10 de julio 2018)

https://www.ecured.cu/Espectro_de_la_luz (15 de julio 2018)

SOLO USO ACADÉMICO

ANEXOS

Estudio de Dióxido de Titanio y sus Efectos

Según un amplio estudio realizado por investigadores del Centro de Cáncer Jonsson Comprehensive de la UCLA (Universidad de California en los Ángeles).

El dióxido de titanio (TiO₂) nanopartículas, que se encuentran en todo, desde los cosméticos para la protección solar para pintar a las vitaminas, causaron daño genético sistémica en ratones. Las nanopartículas de TiO₂ inducen roturas en el ADN de una y de doble cadena y también causa daño cromosómico, así como la inflamación, todo lo cual aumenta el riesgo de cáncer. El estudio de la IJCLA es el primero en mostrar que las nanopartículas tienen tal efecto, dice Robert Schiestl, profesor de ciencias de la patología, oncología de radiación y salud ambiental, científica del Centro de Cáncer Jonsson y autor principal del estudio.

Una vez en el sistema, las nanopartículas de TiO₂, se pueden acumularse en diferentes órganos debido a que el cuerpo no tiene ninguna manera de eliminar las. Y debido a que son tan pequeñas, pueden ir en cualquier parte del cuerpo, incluso a través de las células, y pueden interferir con los mecanismos subcelulares.

En el pasado, estas nanopartículas de TiO₂ se han considerado no tóxico en que no incitan a una reacción química. En cambio, es la interacción de superficie que las nanopartículas tienen dentro de su entorno, en este caso dentro de un ratón que está causando el daño genético. Estas vagan por todo el cuerpo que causan el estrés oxidativo, que puede conducir a la muerte celular.

Se trata de un nuevo mecanismo de toxicidad, una reacción físico-química, estas partículas causan en comparación con las toxinas químicas normales, que son los temas habituales de la investigación toxicológica.

"El principio novedoso es que el titanio por sí misma es químicamente inerte. Sin embargo, cuando las partículas se vuelven cada vez más pequeño, su superficie, a su vez, se hace cada vez más grande y en la interacción de esta superficie con el estrés oxidativo ambiente es inducida dijo. "Este es el primer estudio exhaustivo de genotoxicidad inducida por nanopartículas de dióxido de titanio, posiblemente causada por un mecanismo secundario asociado con la inflamación y / o el estrés oxidativo. Dado el creciente uso de estas nanopartículas, estos resultados plantean la preocupación acerca de los riesgos potenciales para la salud asociados con la exposición"

La fabricación de nanopartículas de TiO₂ es una industria enorme, con una producción de cerca de dos millones de toneladas por año. Además de pintar, cosméticos, protectores solares y vitaminas, las nanopartículas se pueden encontrar en la pasta de dientes, colorantes alimentarios, suplementos nutricionales y cientos de otros productos de cuidado personal.

"Podría ser que una cierta porción de los cánceres espontáneos son debido a esta exposición. " Y algunas personas podrían ser más sensibles a la exposición nanopartículas que otros. "Creo que la toxicidad de estas nanopartículas no se ha estudiado lo suficiente"

Las nanopartículas no pueden ir a través de la piel, por lo que recomienda el uso de un protector solar loción. Aerosol en protectores solares potencialmente podría ser inhalado y las nanopartículas pueden alojarse en los pulmones.

Los ratones fueron expuestos a las nanopartículas de TiO₂ en el agua potable y comenzaron a mostrar el daño genético en el quinto día. El equivalente humano es alrededor de 1 años de exposición a las nanopartículas en un entorno de fabricación. Sin embargo, no está claro si la exposición regular, todos los días en humanos aumenta exponencialmente a medida que el contacto continuado con las nanopartículas se produce con el tiempo.

"Estos datos sugieren que deberíamos estar preocupados por un posible riesgo de cáncer o trastornos genéticos especialmente para las personas ocupacionalmente expuestos a altas concentraciones de nanopartículas de dióxido de titanio, y que podrían ser prudente limitar su ingesta a través de aditivos de drogas, los colores no esenciales de alimentos, etc. " señala el estudio.

Estudio de Efecto Cancerígeno

El dióxido de titanio, un componente que se emplea en algunos productos de uso diario como cosméticos, alimentos, pastas dentífricas o cremas solares podría ser perjudicial para la salud cuando es expuesto a rayos ultravioletas. Un equipo de investigadores ha identificado la variante más dañina del producto y proponen emplear la variante menos perjudicial.

El dióxido de titanio, posible cancerígeno.

En 2006, la Agencia internacional para la investigación del cáncer (IARC, en sus siglas en inglés) con sede en Lyon, Francia, clasificó el dióxido de titanio dentro del grupo 2B de productos carcinógenos. El grupo 2B incluiría "posibles carcinógenos" para los humanos. En 2004, aproximadamente un 70% de los pigmentos producidos en todo el planeta contenían esta sustancia: se emplea para blanquear pinturas, plásticos, papel, tinta, alimentos (los aditivos E171 y E-771) o pastas dentales. También se emplea en cosméticos y productos para el cuidado de la piel y en protectores solares. No obstante, este producto sería cancerígeno pero en grandes cantidades: podría producir cáncer en personas expuestas a altas cantidades del producto como por ejemplo personas que trabajan en centros de producción de dióxido de titanio.

¿Dióxido de titanio más seguro?

Investigadores de la Universidad de Luxemburgo afirman haber demostrado que, aunque el dióxido de titanio (TiO₂) es considerado un ingrediente seguro en productos de empleo diario para la piel, puede provocar efectos potencialmente tóxicos cuando es expuesto a la luz ultravioleta o a los rayos del Sol, es decir, cuando es expuesto al mismo tipo de rayos de los que se supone que debe proteger. Con el fin de tipo de TiO₂ más seguro, los investigadores examinaron las diversas variantes del compuesto.

Tras poner a prueba diversos tipos de dióxido de titanio en polvo sobre piel de cerdo (que es muy parecida a la piel humana) bajo luz ultravioleta, descubrieron que una de las dos variantes más comunes del compuesto, la denominada rutilo, es fácil de eliminar de la piel y tiene escasos efectos sobre la piel. La otra variante más común, denominada anatasa, es difícil de eliminar de la piel y además daña la capa más externa de la piel, incluso bajo dosis bajas de radiación ultravioleta. Parece ser que causa este efecto por medio de radicales libres. Estos hallazgos, afirman los autores, confirman la conveniencia de emplear el rutilo (menos reactivo y con menor carga eléctrica negativa) para fabricar productos cosméticos y farmacéuticos más seguros.

Reportaje Asociación Ibérica de Fotocatálisis. Costos de Edificios que aplican Fotocatálisis. <http://blog.anida.es/edificios-que-limpian-aireciudad-2/>

El pasado año, la Agencia Europea del Medio Ambiente señalaba en un informe que España era el único país de la Unión Europea que suspendía por sus altos

niveles de emisiones de tres de los cuatro principales gases contaminantes: dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles y amoníaco.

Es evidente la necesidad de reducir esos niveles y la manera más efectiva de lograrlo es recortar emisiones.. pero no la única. Nuevos materiales utilizados en la construcción y la reforma de edificios son capaces de provocar reacciones químicas con los gases contaminantes convirtiéndolos en sustancias mucho menos perjudiciales. El proceso se llama fotocatalisis y, los datos de las investigaciones realizadas por los expertos, indican que puede suponer a medio plazo una revolución medioambiental en las grandes urbes.

"Representa una vía muy prometedora para solventar los problemas causados por los óxidos de nitrógeno y otras sustancias tóxicas, mediante su conversión fotoquímica a nitratos, compuestos solubles que pueden ser arrastrados por el agua de lluvia o el riego de las calles", asegura Fran Raya, vicepresidente de Comunicación de la Asociación Ibérica de Fotocatalisis (AIF), en la que participan empresas privadas e instituciones públicas.

Con los fotocatalíticos se elabora todo tipo de materiales de construcción: pavimentos, adoquines, cerámicas, cementos, cubiertas para impermeabilizar... La diferencia con los tradicionales es que se les somete a un proceso químico que transforma sus propiedades para hacer que reaccionen a la luz, provocando una oxidación con los gases contaminantes habituales en la atmósfera, como los NOx, SOx, COVs

Actualmente, su uso se extiende sobre todo en edificios de nueva construcción, aunque de manera puntual, sin utilizar todas las posibilidades que ofrece la industria. Es decir, por ahora no existe un edificio 100% fotocatalítico, que sería capaz de eliminar el 89% de las partículas de óxido de nitrógeno (NOx) de su entorno

Si esto lo consigue una sola construcción, ¿qué podría lograr un barrio entero? AIF se hizo la misma pregunta y sus expertos se pusieron a trabajar para crear modelos que sirvieran de referencia a las ciudades que hayan marcado la sostenibilidad y la eficiencia energética como objetivos prioritarios.

Sus estudios han desarrollado el concepto de 'isla fotocatalítica', zonas urbanas en las que se utilicen estos materiales descontaminantes tanto en la conservación y mantenimiento de los edificios (nuevos techados, mejora de fachadas, cerramientos...) como en los nuevos proyectos de construcción. Y han realizado una proyección práctica de esos efectos convirtiendo una manzana en El Ensanche de Barcelona —la parte más contaminada de la ciudad, sobre todo de partículas de NOx— en una imaginaria isla fotocatalítica.

Este plan virtual de actuación pasaría por cubrir de adoquines elaborados con estos materiales 'verdes' un patio interior de 3.600 metros cuadrados; se utilizarían láminas asfálticas para impermeabilizar una superficie de 9.000 metros cuadrados; nuevas

piezas cerámicas remozarían 427 metros lineales y 25 verticales de fachadas; y se cubrirían 12.600 metros cuadrados de un aparcamiento subterráneo con pintura también fotocatalítica.

Los Ensayos realizados en laboratorio apuntan que estas actuaciones destruirían más de 300 kilos de NOX al año, lo que supondría limpiar 8.000 millones de metros cúbicos de aire. Sería el equivalente a eliminar de la circulación unos 80.000 coches al año. Y siguiendo con la proyección, eso haría que 1.139.500 barceloneses pudieran respirar un aire limpio de gases nocivos.

En efecto, es un resultado de laboratorio que no podrá ser corroborado hasta que no se construya una auténtica isla fotocatalítica y, para ello, es necesario que se involucre tanto la Administración como la industria. La rentabilidad es potencialmente muy alta: según Fran Raya¹¹, el coste de los materiales para construir un edificio descontaminante aumentaría solo entre un 5 y un 10% sobre los que ahora se emplean. Pensemos en los efectos de los gases nocivos sobre la población y los recursos energéticos y económicos que se precisan para reducirlos.. Parece que esas islas limpias podrían ser una realidad muy pronto.

¹¹ Fran Raya: Fran Raya, Director de Marketing y Producto de Ceracasa miembro fundador de la AIF, presentó el concepto de "Isla Fotocatalítica" que la AIF quiere promover a administraciones públicas y arquitectos. Los materiales de construcción fotocatalíticos reducen hasta un de los NOx. Raya ilustró la Isla Fotocatalítica con una manzana del Eixample barcelonés, que construida con materiales fotocatalíticos, eliminaría 330 kilos de Nox al año, lo que supondría limpiar 8 250 millones de litros de aire, que es lo que respiran 1,2 millones de personas (en todo el Eixample viven unas 265 000 personas aproximadamente), o por citar otro.